

Escuela Politécnica Superior
Universidad Carlos III de Madrid



MODELOS DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

D. Alfonso Fernández Viveros

Tutora: Dra. D^a María Jesús López Boada

Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica

Proyecto Final de Carrera

Agradecimientos

Al concluir este documento quedan en el recuerdo todas aquellas personas que me han acompañado desde el comienzo de mi formación. Solo mencionar, por el evidente esfuerzo y apollo recibido, a mi madre y hermana, así como a mis verdaderos amigos con los que se que contaré para todo aquello que me encuentre en la vida.

Por último, por el trabajo realizado y apoyo prestado, dedico mis agradecimientos al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III, y concretamente a M^a Jesús Lóez Boada.

Índice

Cap. 1	INTRODUCCIÓN	Pág. 1
1.1	Introducción	Pág. 2
1.2	Objetivos del proyecto	Pág. 3
1.3	Organización del proyecto	Pág. 3
Cap. 2	EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN	Pág. 4
2.1	Introducción	Pág. 5
2.1.1	Evolución histórica	Pág. 7
2.2	Elementos de un sistema de suspensión	Pág. 8
2.2.1	Elementos elásticos	Pág. 8
2.2.2	Elementos de amortiguación	Pág. 13
2.2.3	Elementos constructivos	Pág. 18
2.2.4	Otros elementos	Pág. 20
2.3	Tipos de sistemas de suspensión	Pág. 21
2.3.1	Introducción	Pág. 21
2.3.2	Clasificación	Pág. 21
2.3.2.1	Según geometría	Pág. 21
2.3.2.2	Según sistema de control	Pág. 29
Cap. 3	FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS	Pág. 34
3.1	Introducción	Pág. 35
3.1.1	La Reología	Pág. 35
3.1.2	Evolución histórica	Pág. 36
3.2	Materiales inteligentes	Pág. 37
3.2.1	Materiales foto y cromoactivos	Pág. 38
3.2.2	Materiales con memoria de forma	Pág. 39
3.2.3	Materiales piezoelectricos y electrostrictivos	Pág. 40
3.2.4	Fluidos electrorreológicos y magnetoreológicos	Pág. 40

3.3	Aplicaciones	Pág. 42
3.3.1	Robótica	Pág. 43
3.3.2	Obra civil	Pág. 43
3.3.3	Suspensión de asientos para vehículos de trabajo pesado	Pág. 44
3.3.4	Amortiguación de vibraciones industriales	Pág. 45
3.4	Descripción del amortiguador magneto-reológico	Pág. 45
Cap. 4	MODELOS MATEMÁTICOS DE UN AMORTIGUADOR MR	Pág. 48
4.1	Introducción: Modelos matemáticos	Pág. 49
4.2	Modelo de Bouc-Wen modificado	Pág. 49
4.3	Modelo dinámico	Pág. 51
Cap. 5	SIMULACIÓN EN MATLAB	Pág. 54
5.1	Introducción: MATLAB	Pág. 55
5.1.1	Herramienta Simulink	Pág. 55
5.2	Simulación del modelo de Bouc-Wen modificado	Pág. 56
5.2.1	Programación de los bloques	Pág. 57
5.2.2	Programación del conjunto	Pág. 63
5.2.3	Definición de los parámetros	Pág. 66
5.3	Simulación dinámico	Pág. 67
5.3.1	Programación de los bloques	Pág. 67
5.3.2	Programación del conjunto	Pág. 69
5.3.3	Definición de los parámetros	Pág. 70
Cap. 6	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	Pág. 71
6.1	Modelo de Bouc-Wen	Pág. 72
6.1.1	Introducción de las variables	Pág. 72
6.1.2	Interpretación de los resultados	Pág. 73

6.2	Modelo dinámico	Pág. 75
6.2.1	Introducción de las variables	Pág. 76
6.2.2	Interpretación de los resultados	Pág. 76
Cap. 7	CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	Pág. 80
7.1	Conclusiones	Pág. 81
7.2	Futuros desarrollos	Pág. 83
ANEXO		Pág. 84
A.1	Anexo/Especificaciones	Pág. 85
BIBLIOGRAFÍA		Pág. 87

Índice de Figuras

Fig. 2.1 Oscilaciones presentes en un automóvil	Pág. 5
Fig. 2.2 Ballesta	Pág. 9
Fig. 2.3 Muelle de suspensión	Pág. 10
Fig. 2.4 Fuerzas transmitidas desde el suelo a la suspensión	Pág. 10
Fig. 2.5 Barra de torsión de un Mazda2	Pág. 11
Fig. 2.6 Cojín neumático montado en una suspensión	Pág. 12
Fig. 2.7 Amortiguador telescópico	Pág. 13
Fig. 2.8 Amortiguador bitubo	Pág. 14
Fig. 2.9 Esquema de un amortiguador monotubo	Pág. 16
Fig. 2.10 Suspensión hidroneumática montada en un C5	Pág. 17
Fig. 2.11 Suspensión del modelo Panamera de Porsche	Pág. 18
Fig. 2.12 Silentblock	Pág. 19
Fig. 2.13 Mangueta de Renault	Pág. 20
Fig. 2.14 Barra estabilizadora en la suspensión del Ford Mustan	Pág. 21
Fig. 2.15 Representación de un eje rígido	Pág. 22
Fig. 2.16 Suspensión rígida, eje traero	Pág. 22
Fig. 2.17 Suspensión de eje torsional	Pág. 23
Fig. 2.18 Esquema de una suspensión con eje de Dion	Pág. 24
Fig. 2.19 Suspensión de brazo tirado	Pág. 25
Fig. 2.20 Suspensión McPherson	Pág. 26
Fig. 2.11 Suspensión del paralelogramo deformable	Pág. 27
Fig. 2.22 Suspensión multibrazo	Pág. 28
Fig. 2.23 Esquema de una suspensión pasiva	Pág. 32
Fig. 2.24 Esquema de una suspensión activa	Pág. 32
Fig. 2.25 Esquema de una suspensión semiactiva	Pág. 33
Fig. 3.1 Gráfica de esfuerzo-densidad de flujo magnético, a velocidad de cortadura elevada	Pág. 36
Fig. 3.2 Pantalla de polímeros multicapa del modelo Kodak Easyshare L.S633	Pág. 38

Fig. 3.3 Fenómeno de fosforescencia	Pág. 39
Fig. 3.4 Fenómeno de fluorescencia	Pág. 39
Fig. 3.5 Esquema del comportamiento de un material con memoria de forma	Pág. 40
Fig. 3.6 Magnetización de un fluido magneto-reológico	Pág. 41
Fig. 3.7 Campo de velocidades, influido por un campo magnético, en un fluido magneto-reológico	Pág. 42
Fig. 3.8 Puente sobre el lago Dong Ting	Pág. 44
Fig. 3.9 Esquema de un amortiguador instalado en un equipo de gran tonelaje	Pág. 44
Fig. 3.10 Esquema de un amortiguador Rheonetic RD-1013-1	Pág. 45
Fig. 3.11 Modelo R8 de Audi con Magnetic Ride	Pág. 46
Fig. 3.12 Esquema de un amortiguador MR	Pág. 46
Fig. 4.1 Esquema del modelo de Wouc-Wen modificado	Pág. 50
Fig. 5.1 Ejemplo de trabajo en Simulink	Pág. 56
Fig. 5.2 Programa “Corriente 1”	Pág. 57
Fig. 5.3 Programa “Corriente 2”	Pág. 58
Fig. 5.4 Programa “Corriente 3”	Pág. 58
Fig. 5.5 Programa “Corrientes”	Pág. 59
Fig. 5.6 Programa “Velocidad2”	Pág. 60
Fig. 5.7 Programa “Velocidad1”	Pág. 61
Fig. 5.8 Programa “Fuerza1”	Pág. 62
Fig. 5.9 Programa “Desplazamineto”	Pág. 63
Fig. 5.10 Programa “Subsistema global”	Pág. 64
Fig. 5.11 Programa “General”	Pág. 65
Fig. 5.12 Programa Signal	Pág. 67
Fig. 5.13 Subsistema Programa	Pág. 68
Fig. 5.14 Programa Completo, conjunto global	Pág. 69
Fig. 6.1 Señal de entrada “x”	Pág. 73
Fig. 6.2 Gráfica Desplazamiento (m)-Fuerza (N)	Pág. 74
Fig. 6.3 Gráfica Velocidad (m/s)-Fuerza (N)	Pág. 75

Fig. 6.4 Gráfica de la variable de entrada “x”	Pág. 77
Fig. 6.5 Gráfica Desplazamiento (m)-Fuerza (N)	Pág. 78
Fig. 6.6 Gráfica Velocidad (m/s)-Fuerza (N)	Pág. 79
Fig. 7.1 Gráfica Velocidad (m/s)-Fuerza (N) para una corriente de 1.75 V	Pág. 81
Fig. 7.2 Gráfica Velocidad (m/s)-Fuerza (N) para una corriente de 10 V	Pág. 82
Fig. A.1 Requerimientos técnicos para Windows	Pág. 85
Fig. A.2 Requerimientos técnicos para Mac	Pág. 85
Fig. A.3 Requerimientos técnicos para Linux	Pág. 86

Índice de Tablas

Tabla 5.1 Valores de los parámetros del modelo de Bouc-Wen	Pág. 66
Tabla 5.2 Valores de los parámetros del modelo dinámico	Pág. 70
Tabla 6.1 Valores de las variables de entrada del modelo de Bouc-Wen	Pág. 72
Tabla 6.2 Valores de las variables de entrada del modelo dinámico	Pág. 76

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Los primeros medios de transporte que aparecieron en vehículos de tracción animal, los cuales consistían en grandes carruajes tirados, normalmente, por caballos o bueyes. Estos no disponían de ningún tipo de sistema que amortiguase las irregularidades del terreno, por lo que una de las preocupaciones de los fabricantes de carruajes fue tratar de hacer más cómodos los vehículos, adaptándolos a los tortuosos caminos empedrados por los que se circulaba en aquella época. Se hicieron varios intentos para reducir esas molestas vibraciones, acolchando los asientos o poniendo unos resortes en el pescante del cochero. Para empezar no estuvo mal, pero el problema aún no se resolvía hasta que alguien tuvo la idea de colgar la cabina del carruaje, con unas correas de cuero, desde unos soportes de metal que venían de los ejes de modo que aquella quedaba suspendida por cuatro soportes y cuatro correas.

El resultado fue que aunque los golpes del rodaje eran parcialmente absorbidos por tal sistema, resultó ser una verdadera coctelera pues se mecía y bamboleaba sin control, añadiendo al relativo confort las delicias del mareo que sufrían continuamente el conductor y los ocupantes. Sin embargo, en estricto sentido, podemos decir que ahí nació el concepto de suspensión: un medio elástico que además de sostener la carrocería asimilaba las irregularidades del terreno.

En la medida en que las suspensiones evolucionaron y fueron haciéndose más eficientes, las ruedas disminuyeron su tamaño (esto se entiende porque las ruedas de gran diámetro reducen el efecto de las irregularidades del camino mientras que las ruedas pequeñas las registran en mayor medida debido a que profundizan en los baches en mayor proporción).

Con el desarrollo del motor de combustión interna a finales del siglo XIX, las ruedas también evolucionaron, de las ruedas de radios se pasaron a las de metal estampado y al de aleación ligera; de la llanta de hierro a la de hule macizo, después al neumático de cuerdas o tiras diagonales y finalmente al radial.

Una suspensión actual de tipo convencional cuenta básicamente con dos elementos: un resorte (o muelle helicoidal) y un amortiguador. El resorte tiene como función principal absorber las irregularidades del terreno para que no se transmitan a la carrocería. El amortiguador a su vez, tiene la función de controlar las oscilaciones de la carrocería. Con esta combinación de elementos se logra una marcha cómoda, segura y estable, acorde con los requerimientos de los automóviles y las vías por las que se circula en la actualidad. Obviamente, los componentes mencionados no trabajan solos, pues se encuentran integrados en conjuntos mecánicos que funcionan como un equipo y que juntos constituyen el sistema denominado suspensión.

Hoy en día la ciencia avanza y los nuevos vehículos requieren sistemas de suspensión más sofisticados que hagan las delicias de sus propietarios. En este sentido, destacan las suspensiones reológicas, que se caracterizan por ser un campo novedoso y moderno, cuya inversión y evolución han

experimentado un gran crecimiento en las últimas décadas. Por estos motivos, se ha desarrollado el presente proyecto fin de carrera que, mediante la herramienta Simulink, modela dos síntesis matemáticas distintas para un amortiguador magneto-reológico (de ahora en adelante el amortiguador magneto-reológico estará referido como amortiguador MR) [3, 7, 14].

1.2 Objetivos del proyecto

El presente proyecto se centra en el estudio de los modelos de un amortiguador de tipo magneto-reológico. Para ello es necesario desarrollar un programa para cada modelo que permita obtener los resultados de las ecuaciones de cada uno de ellos. En concreto los modelos sobre los que se realizan los programas son el modelo de Bouc-Wen y el modelo dinámico.

Los programas deben servir como herramientas flexibles, es decir, poder ajustarse a cambios en las constantes del amortiguador y en las variables de entrada del programa, y aportar resultados que muestren claramente el comportamiento biviscoso, histerético y no lineal del amortiguador.

Para la programación se utiliza la herramienta de programación por bloques Simulink contenida en el *software* MATLAB. Las especificaciones técnicas del *software* se encuentran recogidas en el Anexo A.

1.3. Organización del proyecto

El presente proyecto se encuentra estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 2: en este capítulo se describe la evolución histórica que han tenido los diferentes sistemas de suspensión a lo largo de la historia, además de sus características, componentes y funciones.

Capítulo 3: en este capítulo se hace una breve introducción a los materiales inteligentes y a la reología, para terminar centrándose en la explicación del concepto de fluido reológico y más concretamente del fluido MR. También se describen algunos usos prácticos de estos materiales.

Capítulo 4: en este capítulo se introducen las ecuaciones de los modelos matemáticos propuestos, modelo dinámico y Bouc-Wen. Se explican ambos modelos y se identifican las variables de control para los programas que se realizan en el siguiente capítulo.

Capítulo 5: en este capítulo se exponen las características de la herramienta Simulink y del programa MATLAB al que pertenece. Posteriormente se describen sistemáticamente los bloques de programación hasta llegar a los bloques generales que contienen los programas completos.

Capítulo 6: en este capítulo se exponen las variables escogidas para la simulación y los resultados obtenidos. Se exponen también las conclusiones acerca de estos resultados.

Capítulo 7: finalmente se exponen las conclusiones generales acerca de ambos modelos y las futuras vías de desarrollo.

El resto del proyecto está compuesto por los anexos, la bibliografía y el índice de apartados, figuras y tablas.

CAPITULO 2

EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN

2.1 Introducción

El objetivo principal de la suspensión es evitar que las irregularidades del terreno lleguen a la carrocería del vehículo, es decir, absorber la máxima energía, transmitida en forma de vibraciones, que se desarrolla por las irregularidades del terreno. Para ello, se procede a colocar un medio elástico entre las ruedas y el bastidor, el cual se deformará a causa del peso propio del vehículo y de la inercia originada al elevarse o descender como consecuencia de las irregularidades del pavimento, por lo que absorberá energía, que se liberará cuando se vuelva a la posición inicial. Además de los elementos elásticos, se colocan entre las ruedas y el bastidor elementos amortiguadores que absorben energía sin devolverla, es decir, la transforman. Entonces se obtiene un sistema amortiguado, siendo el amortiguamiento la capacidad de un sistema o cuerpo para disipar energía cinética en otro tipo de energía. Típicamente los amortiguadores disipan la energía cinética en energía térmica y/o en energía plástica.

Se denomina sistema de suspensión, al conjunto de elementos elásticos y amortiguadores, que se colocan entre los elementos suspendidos y no suspendidos de un vehículo y que tienen, entre otros, los siguientes cometidos [2]:

- Hacer más confortable el habitáculo del vehículo, reduciendo las acciones a las que este se encuentra sometido durante la conducción, entre las que se pueden destacar (Fig. 2.1):
 - Empuje: son oscilaciones que se producen en torno al eje vertical al atravesar baches.
 - Cabeceo: son oscilaciones producidas a lo largo del eje transversal del vehículo, principalmente en las frenadas y aceleraciones bruscas.
 - Balanceo: son oscilaciones producidas entorno al eje transversal de vehículo al tomar curvas a alta velocidad.

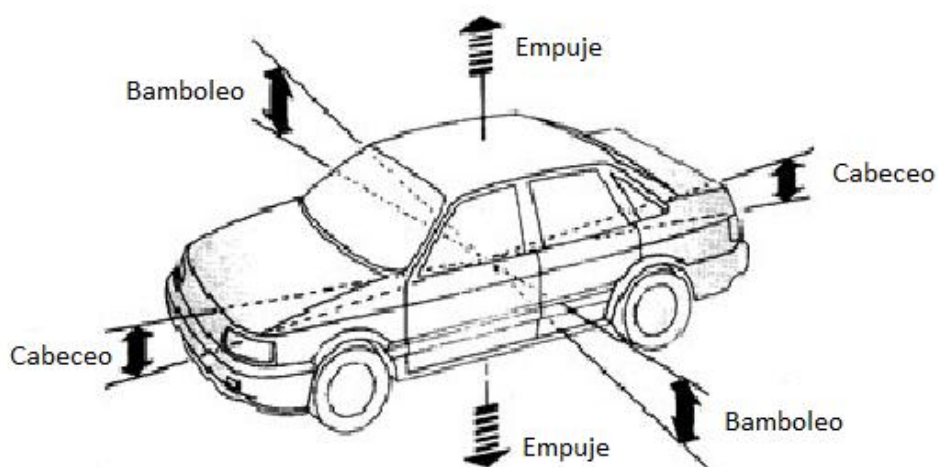


Figura 2.1 Oscilaciones presentes en un automóvil

- Proteger de vibraciones las distintas piezas que componen el vehículo.
- Ser capaz de absorber las distintas irregularidades del pavimento de forma que nunca se pierda el contacto entre el neumático y el suelo.

Además de las características ya descritas es necesario que el sistema de suspensión cumpla con otras que se describen a continuación:

- Transmitir las fuerzas de aceleración y de frenada entre los ejes y el bastidor.
- Resistir el par motor, de frenada y las aceleraciones producidas en las curvas.
- Conservar el ángulo de dirección en todo el recorrido.
- Conservar el paralelismo entre los ejes y la perpendicularidad del bastidor.
- Proporcionar una estabilidad adecuada ante el balanceo.
- Soportar el peso y la carga del vehículo.

El sistema de suspensión está compuesto por una serie de elementos elásticos que se interponen entre la masa suspendida y la masa no suspendida [3]:

- Masa suspendida: se refiere a todo el peso que se aplica a la suspensión y se compone de los mecanismos soportados por el chasis o bastidor del vehículo, grupo motopropulsor, carrocería, elementos auxiliares y de confort, etc.
- Masa no suspendida: se refiere al peso del vehículo que no está aplicado a la suspensión, y se compone prácticamente del conjunto de las ruedas.

Del adecuado diseño del sistema de suspensión depende, en gran medida, la estabilidad del vehículo, ya que las fuerzas de interacción entre el pavimento y los neumáticos son las responsables del control directo sobre el vehículo. En el caso de que se pierda el control de estas fuerzas por falta de contacto entre el neumático y el pavimento, se disminuirá la capacidad de control sobre el vehículo y, por tanto, la seguridad de sus ocupantes. Para evitar que aparezcan fenómenos desestabilizadores, el sistema de suspensión debe presentar las características siguientes: correcto cálculo de sus parámetros de elasticidad para evitar que tengan lugar rebotes demasiado duros cuando se absorben las irregularidades del terreno, y determinación del coeficiente de amortiguación óptimo, de forma que no se produzcan oscilaciones elevadas cuando el sistema entre en funcionamiento.

La elasticidad de un sistema de suspensión depende de las características del elemento elástico, de la masa suspendida y de las fuerzas enumeradas (empuje, cabeceo y balanceo). Estos parámetros

caracterizan la amplitud de las oscilaciones y su frecuencia, f , que tienen lugar en un vehículo. Existen otros elementos que absorben, por las características del material, una pequeña parte de energía, por ejemplo los neumáticos.

2.1.1 Evolución histórica

La historia de la amortiguación, como en muchos casos, comienza con el planteamiento de un problema; una preocupación de los fabricantes de carruajes, fue tratar de hacer más cómodos los vehículos ya que los caminos empedrados eran seguramente una tortura para los ocupantes de los antiguos carros de tracción animal, pues cada hoyo o piedra que las ruedas pasaran se registraba directamente en todo el vehículo, transmitiendo la energía al conductor.

Se hicieron varios intentos para reducir esos impactos, acolchando los asientos o poniendo unos resortes en el pescante del cochero, pero el problema aún no se resolvía, hasta que alguien tuvo la idea de colgar la cabina del carruaje, con unas correas de cuero, desde unos soportes de metal que venían de los ejes, de modo que quedaba suspendida por cuatro soportes y cuatro correas. El resultado fue que aunque los golpes del rodaje eran parcialmente absorbidos por el sistema, resultó ser una verdadera coctelera pues se mecía y bamboleaba sin control. Sin embargo, en estricto sentido, se puede decir que ahí nació el concepto de suspensión: un medio elástico que además de sostener la carrocería, asimile las irregularidades del camino.

En la medida en que las suspensiones evolucionaron y fueron haciéndose más eficientes, algunos elementos fueron cambiando y renovándose, por ejemplo, las ruedas disminuyeron su tamaño. Esto se entiende, porque las ruedas de gran diámetro reducían el efecto de las irregularidades del camino, y con la integración de suspensiones, las ruedas su fueron haciendo mas pequeñas, pese a que entraban en los hoyos en mayor proporción. Con el desarrollo del motor de combustión interna aplicado a los vehículos, las ruedas también evolucionaron, de la rueda de radios, pasaron a la de metal estampado y a la de aleación ligera; de la llanta de hierro a la de hule macizo, después al neumático de cuerdas o tiras diagonales y finalmente al radial.

La primera gran evolución de la suspensión fue la incorporación de las ballestas, que separaban los ejes de la carrocería, lo que mejoró algo el confort en el automóvil. El inconveniente de las ballestas era la fuerza que ejercían, ya que ocasionaban que el vehículo perdiera estabilidad, esto era debido a que cuando la energía de la ballesta se dispersaba, provocaba vibraciones y fuertes oscilaciones en el automóvil. Para solucionar estos inconvenientes se introdujo en los sistemas de suspensión el resorte helicoidal y la barra de torsión.

De la misma forma evolucionaron los amortiguadores con el avance de las tecnologías aplicadas a los transportes, comenzando con resortes y medios elásticos, que tenían el inconveniente de la plastificación cuando se superaban los límites de los materiales, lo cuál tambien ocurriría con otros modelos de suspensión como el de ballestas. Más adelantes comenzarían a aparecer métodos más

sofisticados, los amortiguadores, consistentes en vainas agujereadas, rellenas de fluidos que tenían el cometido de absorber la energía transmitida por un émbolo. Y finalmente se llega hasta nuestros días, con la implantación de la suspensión activa, que tiene la posibilidad de adaptarse a los requerimientos de los distintos terrenos [5, 10].

2.2 Elementos de un sistema de suspensión

El sistema de suspensión está compuesto por un elemento flexible o elástico (ballesta, muelle helicoidal, barra torsional, cojín neumático, etc.) encargado de absolver la energía generada en los impactos debido a las irregularidades del terreno, y un elemento de amortiguación (amortiguador), cuya misión es neutralizar las oscilaciones de la masa suspendida, originadas por el elemento flexible al devolver la energía acumulada del impacto.

Los sistemas de suspensión incorporan elementos que mejoran el comportamiento dinámico del vehículo, como barras estabilizadoras, tirantes de reacción, barras transversales. A continuación, se describen los distintos elementos que componen el sistema de suspensión en la mayoría de los automóviles [1, 2, 3].

2.2.1 Elementos elásticos

La misión de los elementos elásticos es impedir que las oscilaciones del terreno lleguen a la carrocería en forma de golpes, mejorando el confort y la seguridad del vehículo al asegurar el contacto de las ruedas con el terreno, y también la estabilidad y la capacidad para dirigir el vehículo.

Se pueden encontrar distintos elementos:

- Ballestas

Las ballestas (Fig. 2.2) se componen por una serie de hojas de acero, unidas por el centro, formando un conjunto elástico y de gran resistencia a la rotura; cuando el vehículo atraviesa una irregularidad, las hojas se deforman, y al tener movimiento relativo entre ellas, debido a la fricción disipan la energía absorbida en forma de calor. Pueden tener dos tipos de montajes: longitudinal o transversal:

- Montaje longitudinal: es el más utilizado. Se coloca una ballesta por cada rueda, dispuestas en el sentido de avance del vehículo. La ballesta se une por un lado a un punto fijo y por el otro a uno móvil, para permitir los movimientos oscilantes.
- Montaje transversal: utilizado principalmente en turismos y vehículos todoterrenos. Se realiza uniendo los extremos de la ballesta al puente, mediante gemelas, y la base de la ballesta al bastidor.



Figura 2.2 Ballesta

Las principales ventajas que aportan las ballestas son:

- Sólo se deforman en el sentido vertical y no en el horizontal, por lo que al usarlas, los puentes se mantienen alineados sin otros elementos.
- Transmiten la tracción y la frenada.
- Son de fácil construcción y baratas.

Sin embargo, los principales inconvenientes son que en el eje delantero, montadas longitudinalmente, limitan el ángulo de orientación de la rueda y son relativamente pesadas y requieren limpieza y lubricación en los extremos de las hojas para que no se endurezca la suspensión.

En vehículos pesados para variar la elasticidad de la suspensión cuando aumenta la carga, se puede montar una ballesta auxiliar o ballestín que entra en acción cuando se comprime en exceso la ballesta principal.

Las ballestas pueden clasificarse en dos grandes grupos :

- Semi-elípticas: Se denominan así porque sus hojas forman parte de una elipse imaginaria. Se caracterizan y distinguen por tener las hojas unas en contacto con las otras, formando un paquete, que precisa de lubricación periódica.
- Parabólicas: Las ballestas parabólicas tienen las hojas con forma de parábola. Se distinguen porque sus hojas no se tocan entre sí, existiendo un espacio importante entre ellas. Para compactar las hojas y hacer un único conjunto, se intercalan entre ellas unos separadores de material compuesto o nylon. Estas ballestas tienen una mayor flexibilidad y no requieren mantenimiento.

Las características que posee una ballesta (número de hojas, espesor de las mismas, cargas que soportan, etc.), se encuentran normalizadas con las normas UNE 26 224-5-6-7 y 26 063. Las ballestas, muy utilizadas antiguamente, se han visto gradualmente sustituidas por otro tipo de muelles, limitándose en la actualidad a vehículos de gran tonelaje, todo terreno y algún turismo comercial.

- Muelles

Son elementos elásticos que se utilizan en la suspensión, por su capacidad para almacenar energía tensional y después retornar a la forma original. Estos elementos mecánicos (Fig. 2.3) se utilizan modernamente en casi todos los turismos, en sustitución de las ballestas, pues tienen la ventaja de conseguir una elasticidad blanda, debido al gran recorrido del resorte, sin apenas ocupar espacio ni sumar peso.



Figura 2.3 Muelle de suspensión

Los muelles helicoidales consisten en un arrollamiento helicoidal, de acero; el diámetro del hilo del muelle varía en función de la carga que tienen que soportar, siendo los muelles de mayor diámetro cuanta mayor sea la carga. Las últimas espiras son planas para facilitar el asiento del muelle sobre sus bases de apoyo, y así facilitar que las fuerzas perturbadoras que se transmiten desde el suelo a las ruedas y de estas a la suspensión (Fig. 2.4) sean entonces absorbidas por los muelles.

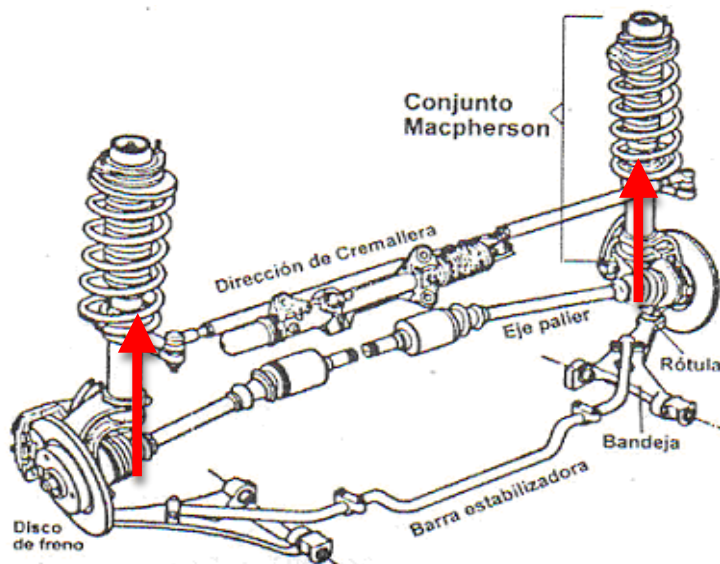


Figura 2.4 Fuerzas transmitidas desde el suelo a la suspensión

Los muelles helicoidales no pueden transmitir esfuerzos laterales, y requieren, por tanto, en su montaje, bielas de empuje lateral y transversal para la absorción de las reacciones de la rueda. Estas bielas trabajan a torsión, retorciéndose proporcionalmente al esfuerzo que tienen que soportar,

acortando su longitud y volviendo a su posición de reposo cuando cesa el efecto que produce la deformación.

La flexibilidad de los muelles depende del número de espiras, del diámetro del resorte, del paso entre espiras, del espesor o diámetro del hilo, y de las características del material. Se pueden conseguir muelles con una flexibilidad progresiva, utilizando diferentes diámetros de enrollado por medio de muelles helicoidales cónicos, por medio de muelles con paso entre espiras variable o disponiendo de muelles adicionales que en efecto, cuando el vehículo circula en vacío, sólo trabaja el muelle principal y cuando la carga es capaz de comprimir el muelle hasta hacer tope con el auxiliar, se tiene un doble resorte, que, trabajando conjuntamente, soporta la carga dando mayor rigidez al conjunto.

Las espiras de un muelle helicoidal no deben, cuando se comportan de forma elástica, tener contacto entre ellas, es decir, que la deformación tiene que ser menor que el paso del muelle por el número de espiras; de ocurrir lo contrario, cesa el efecto del muelle y entonces las sacudidas por la marcha del vehículo se transmiten de forma directa al chasis.

- Barras de torsión

Las barras de torsion (Fig. 2.5) pueden ser utilizadas como medio para almacenar energía tensional, por tanto, tienen las mismas aplicaciones que el muelle helicoidal y la ballesta. Se basan en el principio de que si a una varilla de acero elástico, sujeta por uno de sus extremos, se le aplica por el otro un esfuerzo de torsión, esta varilla tenderá a retorcerse, volviendo a su forma inicial, debido a su elasticidad, cuando cesa el esfuerzo de torsion [13].



Figura 2.5 Barra de torsión de un Mazda2

- Cojines neumáticos

En sistemas de gran peso o que requieren un mayor confort, como pueden ser los trenes de pasajeros, es necesario incluir algún modelo de suspensión que absorba la energía transmitida al chasis de manera más eficaz y la libere de forma más constante. Es así, y ya que se dispone de la tecnología necesaria para producir grandes presiones, que se introducen los cojines neumáticos en vehículos que requieran estas prestaciones. En esta suspensión se sustituye el muelle helicoidal por un fuelle o cojín neumático construidos en polímeros de alta resistencia a tracción y compresión y alto límite elástico, ya que se utilizan como elementos flexibles. Debido al constante avance en la ingeniería de materiales cada vez son más resistentes los cauchos y las fibras de refuerzo lo que permite su adaptación en vehículos de mayor peso.

Para rentabilizar el uso de los recursos, estos elementos se utilizan principalmente en los vehículos dotados con frenos de aire comprimido, debido a que el aire o gas, ya está disponible en el vehículo; o en turismos de alta gama debido al elevado coste que requieren estas suspensiones.

La ventaja principal de las bolsas de aire, comparadas con el resto de los elementos elásticos, es que su presión interior puede ser modificada de acuerdo a la carga y con ello mantener la misma altura con el vehículo cargado, aprovechando la compresibilidad del aire interior. Además, proporcionan una suspensión muy suave y suficientemente duradera.

Se puede ver, en la Figura 2.6, un cojín neumático montado dentro de un sistema de suspensión neumático [13].



Figura 2.6 Cojín neumático montado en una suspensión

En algunos montajes los cojines neumáticos están provistos de válvulas por las que se expulsa e introduce gas aumentando o disminuyendo la dureza del cojín, de forma que se consigue variar la respuesta del elemento elástico.

2.2.2 Elementos de amortiguación

En el montaje de sistemas de suspensión, se incluyen elementos elásticos que, por sus características, consiguen hacer del sistema rígido del vehículo, uno móvil que se adapte a los distintos terrenos. No obstante se debe saber que pese a que estos elementos pueden tener unas excelentes propiedades elásticas, no absorben, o disipan la energía que acumulan cuando se comprimen o extienden, y de esta forma la devuelven al retomar su longitud inicial. Para resolver este problema se introduce, en los sistemas de suspensión de los vehículos, un elemento amortiguador, que como su propio nombre indica, amortigua la energía cinética que se le transmite, disipándola en forma de calor u otro tipo de energía.

El principio del amortiguador se le adjudica al Ingeniero James Watt, quien creó un dispositivo que absorbía las vibraciones de la máquina a vapor. Al principio, se le conoció como “regulador de bolas” e introdujo los requerimientos básicos de operación que son usados actualmente en el amortiguador. Posteriormente fueron de fricción. Estos dispositivos no eran ni muy duraderos ni muy satisfactorios en su rendimiento; sin embargo, sirvieron para señalar la necesidad de buscar otros dispositivos de amortiguación que fueran mas eficientes y confiables. Los amortiguadores telescópicos (Fig. 2.7) hidráulicos fueron la respuesta a esta necesidad y surgieron a principios de los años veinte. Los primeros amortiguadores hidráulicos eran de "una sola acción", es decir, que trabajaban en una sola dirección, generalmente de extensión y se les conoció como de "leva y brazo o palanca". Estaban hechos de un pesado cuerpo de hierro fundido, conteniendo un pistón accionado por una leva que operaba dentro de un cilindro vertical. El cuerpo quedaba sujeto con pernos al bastidor del vehículo y la leva era accionada por una palanca o brazo horizontal conectado al eje por una correa de algodón. La evolución de este sistema son los amortiguadores de “doble acción” que tienen una relevancia comercial mayor, ya sea por sus altas prestaciones o por el equilibrio entre su capacidad de respuesta y su coste [2].

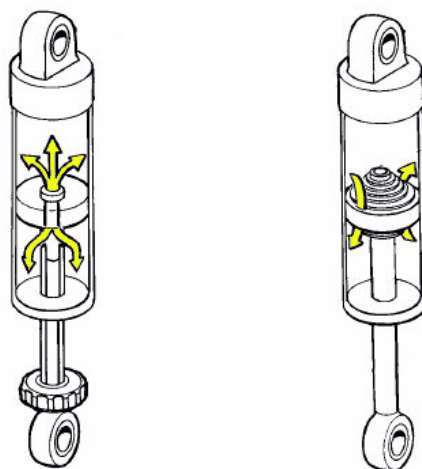


Figura 2.7 Amortiguador telescópico

Actualmente los sistemas de amortiguación se dividen en los siguientes tipos:

- **Amortiguador bitubo**

Los amortiguadores telescópicos bitubo son los más usados en la actualidad, dividiéndose a su vez en amortiguadores bitubo no presurizados, o atmosféricos, y los presurizados.

Los amortiguadores bitubo (Fig. 2.8), constan de dos cámaras, la interior y la de reserva, y de dos grupos de válvulas, unas situadas en la cabeza del vástago y otra situada en la base de la cámara interior (uniendo ambas cámaras), que se conoce como válvula de pie.

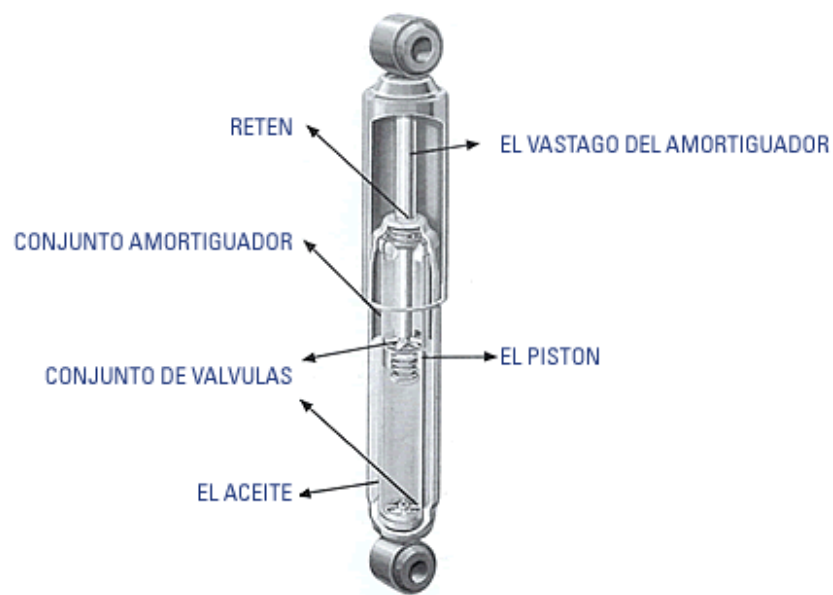


Figura 2.8 Amortiguador bitubo

Su funcionamiento se divide en dos etapas, en la carrera de compresión el vástago comprime el fluido dentro de la cámara interior que pasa por las válvulas situadas en el pistón y la válvula de pie, llegando a la cámara de reserva, la resistencia que desarrolla el fluido al pasar por las válvulas es de la que depende la constante de amortiguación del sistema. Durante la carrera de expansión el fluido retorna a la cámara interior volviendo a la posición inicial [8].

Como ya se ha comentado existen dos grupos dentro de los amortiguadores bitubo, los presurizados y los no presurizados:

- Amortiguadores bitubo presurizados: la principal diferencia entre ambos está en la existencia de un gas presurizado dentro de la cámara de reserva, el cuál se comprime, en la carrera de compresión, por la entrada en esta cámara del fluido de trabajo, y se expande, en la carrera de expansión, expulsando el fluido de la cámara.

Las principales ventajas respecto de los no presurizados son las siguientes:

- Respuesta mas sensible de la válvula en condiciones de pequeñas amplitudes.
 - Mejor respuesta del amortiguador en condiciones extremas.
 - Mayor confort en marcha.
 - Siguen operativos pese a las pérdidas de gas.
 - Reducen de el ruido.
 - Solucionan el problema de la cavitación, manifestado en los no presurizados.
- Amortiguador bitubo no presurizado: también conocidos como atmosféricos ya que la cámara de reserva se encuentra a presión atmosférica, lo que implica que no existan la amortiguación adicional aportada por el gas presurizado. Los dos grandes inconvenientes de este tipo de amortiguadores son:
- La columna de fluido de trabajo fluye hacia la cámara de reserva por efecto de la gravedad cuando están mucho tiempo en desuso.
 - Cuando se enfría el fluido de trabajo, tras haber estado en funcionamiento largo tiempo, se comprime absorbiendo aire del exterior, lo que se traduce en la aparición de burbujas dentro del amortiguador que provocan discontinuidades en la función de amortiguación.

- Amortiguador monotubo:

La aparición de los amortiguadores monotubo es mas tardía que la de los amortiguadores bitubo, y se implantaron en vehículos de competición, no obstante ultimadamente se están montando en vehículos utilitarios.

Los amortiguadores monotubo (Fig. 2.9) constan de una sola cámara interior, de dos pistones, uno flotante (que separa gas presurizado de aceite) y otro no, y un solo grupo de válvulas situadas en el pistón no flotante.

El funcionamiento del amortiguador, como en el caso anterior, se divide en dos etapas, la carrera de compresión, en la que el vástago presiona el aceite y este al gas, equilibrando las presiones a ambos lados del pistón flotante. Además el aceite pasa por las válvulas con cierta resistencia, de la cual se deriva la constante de amortiguación del sistema. Por último, la compresión del gas permite compensar el volumen desplazado por el vástago [8].

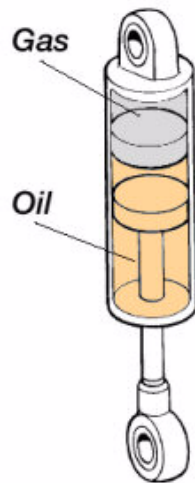


Figura 2.9 Esquema de un amortiguador monotubo

En la otra etapa, carrera de expansión, el vástago comprime el aceite que había pasado por las válvulas haciéndolo retornar, y el volumen desalojado por el pistón permite la descompresión del gas y con ello el nuevo equilibrio de presiones en torno al pistón flotante, lo que lo devuelve a su posición inicial.

Las ventajas que tienen este modelo de amortiguadores respecto de los bitubo no presurizados son las siguientes:

- Debido a que la cámara se encuentra en contacto directo con el aire, permiten mayor refrigeración, lo cual es realmente importante dado que los amortiguadores transforman energía cinética en calor.
- Los pistones pueden tener mayor tamaño en su base sin suponer mayor tamaño de la carcasa, lo que permite reducir las presiones de operación.
- En concreto en comparación los bitubo no presurizados no se deterioran por falta de uso, debido a la presurización no tienen problemas de cavitación y pueden montarse en cualquier posición.

Por otro lado las desventajas que presentan son las siguientes:

- Son mas costosos de producir por requerir mayor precisión, menores tolerancias y estanqueidad del gas.
- La valvulería es mas compleja.

Existen otros sistemas de amortiguación más compleja, que por su relevancia en los vehículos turismo se exponen a continuación:

- Amortiguador hidroneumático

Estos amortiguadores fueron diseñados por Citroën durante la década de los 50 y suponen un sistema que por su complejidad ha aislado a la Marca, debido a la imposibilidad de tratarlos en talleres convencionales. Están compuestos por esferas metálicas (de 5 a 10 en total) llenas de gas y un fluido de trabajo LHM (aceite, lo que supuso que en un principio se conocieran como amortiguadores oleoneumáticos), los cuales están separados por una membrana; las esferas están situadas una en cada rueda (como se observa en la Figura 2.10) y otra central que las conecta a todas mediante un circuito hidráulico y hace la función de acumulador.

Su funcionamiento es el siguiente, en la carrera de compresión el vástago se introduce en la esfera presionando el fluido, el cual a su vez presiona el gas detrás de la membrana; por otro lado en la carrera de expansión, simplemente el vástago y las presiones dentro de la esfera vuelven a su estado inicial. Para adaptar la suspensión, se conduce mas o menos cantidad de fluido por el circuito desde el acumulador hasta las suspensiones. Finalmente se consigue un tipo de amortiguador muy simple y uno de los más eficaces, aunque con un sistema de abastecimiento de fluido y presurización muy complejo.

Este sistema tiene algunas ventajas como el hecho de poder nivelar la altura del vehículo tanto cargado como sin cargar, que se pueda utilizar el mismo circuito y fluido de trabajo para el control de los frenos, el embrague e incluso los faros adaptativos y los elevallunas, y la durabilidad y fiabilidad del sistema. Por otro lado, la complejidad del sistema electrónico de control y la alta cualificación necesaria para manipularlo, suponen un problema a la hora de fabricarlos y de su posterior mantenimiento [10].

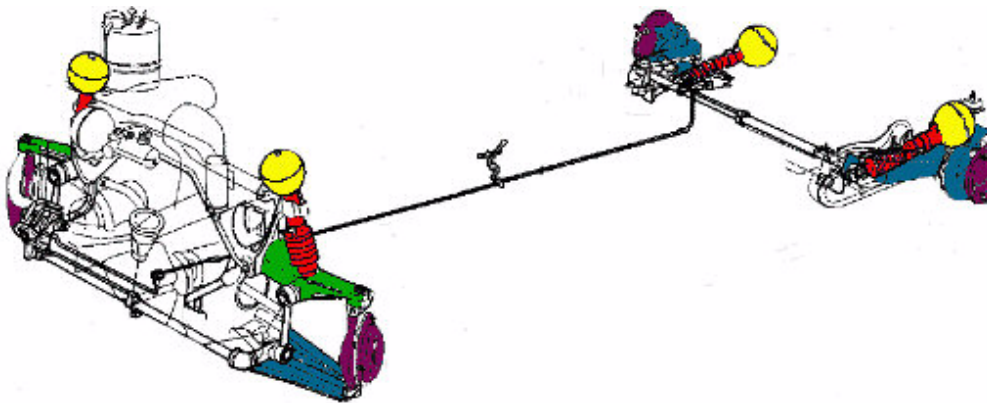


Figura 2.10 Suspensión hidroneumática montada en un C5

- Amortiguación neumática

Este sistema de amortiguación está formado por una cámara llena de aire comprimido y un vástago que se introduce en ella presionando el gas. En este sistema se tiene la capacidad de modificar la presión interna de la cámara, de forma que se puede variar la constante de amortiguamiento del sistema. Además, como en el caso anterior, esta suspensión permite la variación de la altura del vehículo. Se compone principalmente, además del grupo amortiguador principal, de una bomba de presión o compresor, que alimenta mediante un circuito los amortiguadores y de un grupo de electroválvulas que permiten o restringen el paso del caudal de aire comprimido.

Como ventajas principales se tiene la gran sensación de confort, la adaptabilidad a diferentes terrenos y que son duraderos y eficaces. No obstante en contraposición, son caros de fabricar (por lo que se utilizan en vehículos de alta gama, como el modelo Phaeton de VW, o el Panamera de Porsche, Fig. 2.11), el consumo de energía es muy elevado por abastecer el compresor y hay posibilidad de descompresiones y fugas con el deterioro de los materiales por su uso [2,10, 13].

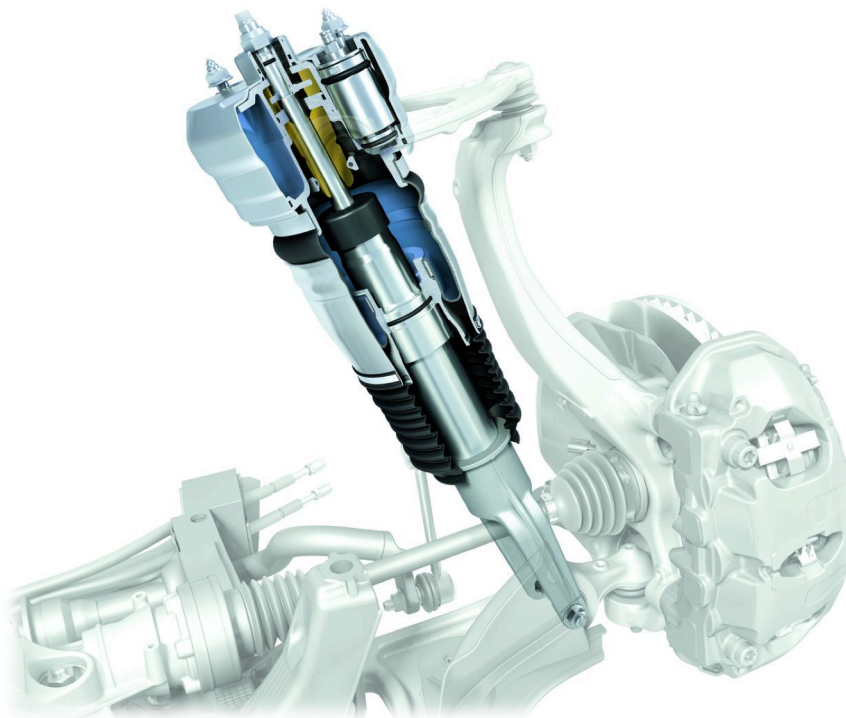


Figura 2.11 Suspensión del modelo Panamera de Porsche

2.2.3 Elementos constructivos

Como se ha visto la suspensión se encuentra entre la masa suspendida y la no suspendida, no obstante para que el coche esté suspendido sobre las ruedas y no apoyado en ellas (como, por ejemplo en un *kart*) hace falta, además de un elemento elástico y un amortiguador, unos elementos de unión entre la pieza que soporta la rueda y el bastidor, además estos elementos deben permitir el movimiento

relativo entre ambos. Por otro lado los elementos de guiado, se encargan de absorber los esfuerzos de tracción del grupo motopropulsor y transmitirlos a la carrocería, así como los esfuerzos del eje directriz y los esfuerzos producidos durante la conducción. En cualquier caso, son la única unión física de los ejes con el bastidor y soportan todos los esfuerzos excepto la carga. Estos elementos constructivos son generalmente los siguientes:

- Los casquillos o *silentblock*

Los casquillos o *silentblock* (Fig. 2.12) son aislantes de caucho vulcanizado u otro material elastómero que se encargan de amortiguar las reacciones en los apoyos de la suspensión. Cuando existe movimiento relativo entre dos elementos, los casquillos absorben las perturbaciones transmitidas de uno a otro. En el montaje de los casquillos se tiene la posibilidad de atornillarlos o montarlos a presión.



Figura 2.12 *Silentblock*

- El brazo de suspensión

Los brazos de suspensión es un elemento de unión, diseñado para soportar esfuerzos en la dirección del propio brazo (tracción o compresión). Normalmente no están diseñados para soportar esfuerzos laterales (paralelos a los ejes de sus articulaciones). Existen diferentes nombres para los brazos, con significados más o menos específicos según su ubicación y función.

- La mangueta

La mangueta (Fig. 2.13) de la suspensión es una pieza fabricada con acero o aleaciones que une el buje, en el cual se montan los rodamientos que permiten el giro relativo de la rueda, a los elementos de la suspensión (tirantes, trapecios, amortiguador, etc.).

- Las rótulas

Las rótulas son el elemento de unión y fijación de la suspensión y de la dirección, al permitir el movimiento relativo, y de esta forma convertir el sistema en un mecanismo que no transmita los esfuerzos de flexión y torsión desde la suspensión o la dirección al resto del vehículo, manteniendo así la geometría [13].

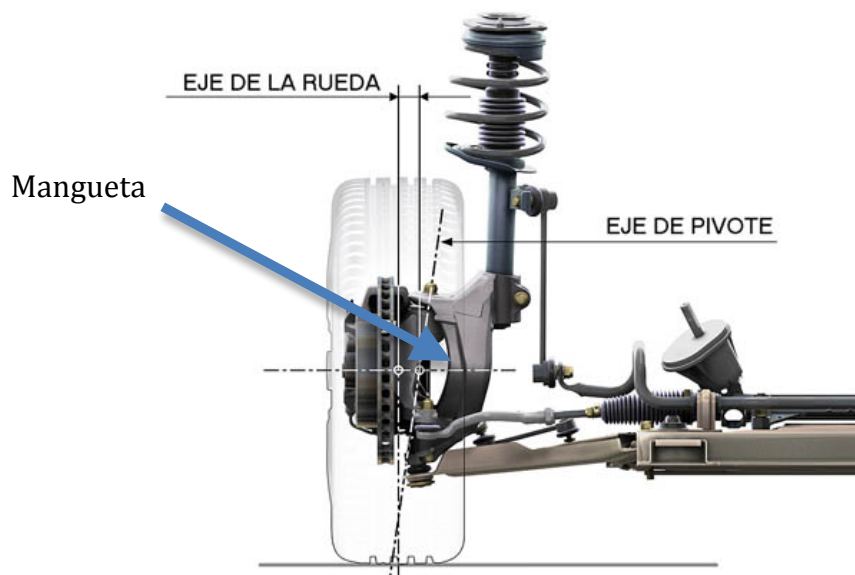


Figura 2.13 Mangueta de un Renault

2.2.4 Otros elementos

Además de los elementos descritos en el apartado anterior, 2.2.3, en los sistemas de suspensión de los automóviles se pueden utilizar otros tipos de elementos para mejorar el comportamiento dinámico del vehículo. Algunos de ellos son los siguientes:

- Las barras estabilizadoras

Consisten en una barra de acero elástico cuyos extremos se fijan a los soportes de la suspensión de las ruedas. Al tomar una curva, una de las ruedas tiende a bajar y otra a subir, esto crea un par de torsión en la barra impidiendo el movimiento y por tanto que la carrocería se incline hacia el exterior de las curvas, manteniéndola estable.

El mismo efecto se produce cuando una de las ruedas encuentra un bache, creando, al subir o bajar la rueda, un par de torsión en la barra que hace que la carrocería se mantenga horizontal.

Se montan en turismos de alta gama, pese a que hay casos de turismos de gamas inferiores que también las llevan, como la gama de Ford Mustan (Fig. 2.14) [13].

- Las barras transversales o barras *Panhard*

Son barras de acero montadas en sentido transversal al de la marcha y oblicuas con relación al eje. Permiten el movimiento vertical del bastidor, pero impiden el movimiento transversal entre la mano derecha e izquierda del vehículo.

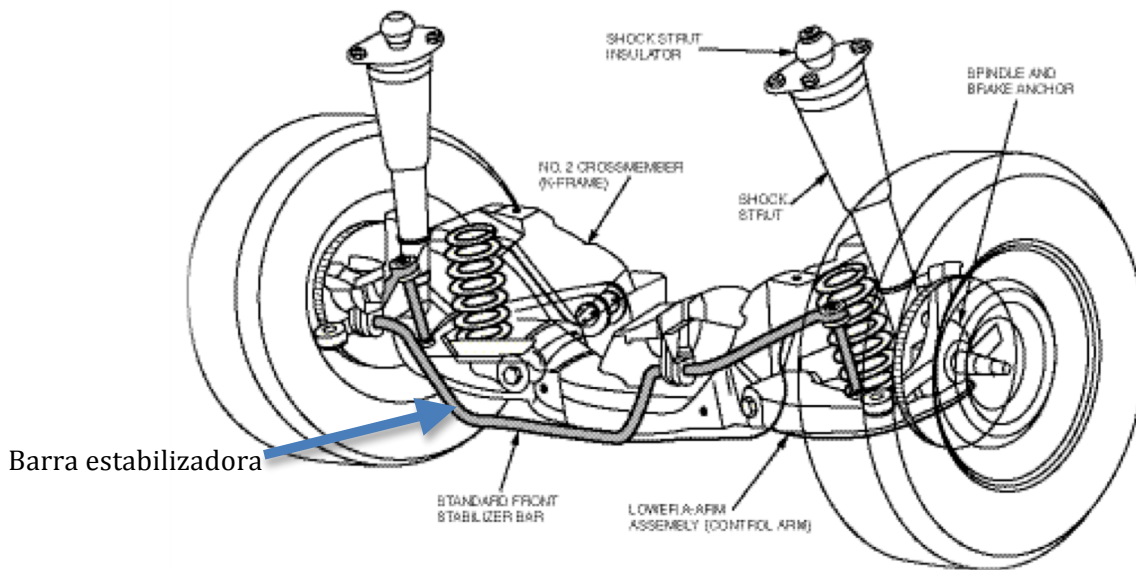


Figura 2.14 Barra estabilizadora en la suspensión del Ford Mustan

2.3 Tipos de sistema de suspensión

2.3.1 Introducción

Existen varias formas de clasificar las suspensiones, dependiendo de su geometría, según el elemento amortiguador o el elemento elástico, según el sistema de control, etc. En este proyecto se hace referencia a dos tipos de clasificaciones. La primera depende de la capacidad que tiene las ruedas opuestas de girar con independencia una de otra, esta clasificación hace referencia al tipo de construcción geométrica o estructural. La segunda clasificación está relacionada con los diferentes sistemas de funcionamiento de los amortiguadores.

La clasificación de las suspensiones presenta ciertos problemas, por ejemplo, estructuralmente se puede hablar de “suspensiones multibrazo”, pero no hay una convención sobre cuántos brazos son necesarios para ser “multi”, y ni siquiera sobre lo que es un “brazo”. Por ejemplo, hay distintos tipos de suspensiones que se podrían llamar «multibrazo» y que funcionalmente son muy distintas [1, 3, 5, 8].

2.3.2 Clasificación

2.3.2.1 Según la geometría

La clasificación de la suspensión según su geometría se engloba tres en grupos principales: suspensiones de eje rígido, semirrígidas e independientes:

- Suspensión de eje rígido

La suspensión de eje rígido también es denominada “sistema dependiente”. En esta configuración, las ruedas del mismo eje están conectadas mediante un elemento rígido, normalmente una barra. En consecuencia, todo el movimiento que ejecuta una rueda se transmite a la otra del mismo eje. En la Figura 2.15 se ve como al elevarse una rueda, se transmite la inclinación al eje y de este a la otra rueda. Como el eje está fijado directamente sobre el bastidor, la inclinación se transmite a todos los elementos no suspendidos, y de estos al conjunto del vehículo.

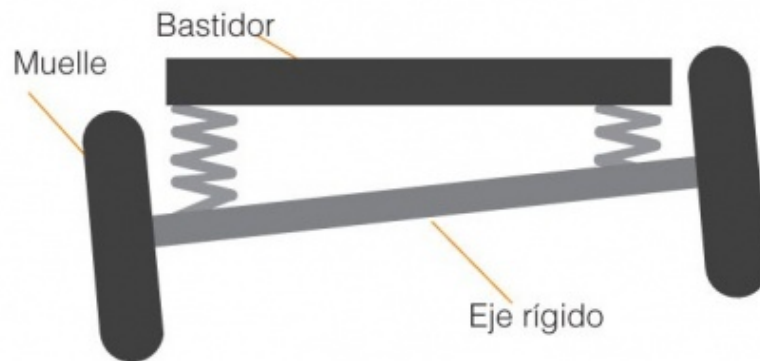


Figura 2.15 Representación de un eje rígido

Como principales ventajas de los ejes rígidos destacan la sencillez de diseño, menor coste de diseño y fabricación, no producen variaciones significativas en los parámetros de la rueda como caída, avance, etc. Además resultan muy robustos para conducción *offroad* y para soportar grandes cargas, y esto hace que esta configuración, actualmente, se utilice en ejes traseros de todoterrenos, *pick up*, y camiones de bajo y gran tonelaje. En la Figura 2.16 se muestra una suspensión de eje rígida en la parte trasera de un vehículo [13].

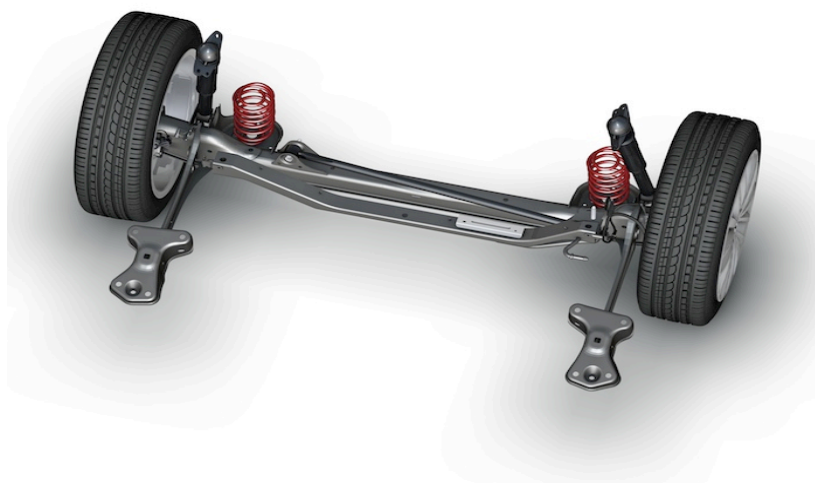


Figura 2.16 Suspensión rígida, eje trasero

Además, las suspensiones de eje rígido presentan el inconveniente de que al estar unidas ambas ruedas, las vibraciones producidas por la acción de las irregularidades del pavimento, se transmiten de un lado al otro del eje, además el peso de las masas no suspendidas aumenta notablemente debido al peso del eje rígido y al peso del grupo cónico diferencial en los vehículos de tracción trasera. Esto hace que no sean cómodas para los pasajeros y presentar una menor seguridad.

- Suspensión semirrígida

La diferencia entre este tipo de suspensión y el anterior es, principalmente, que en este caso la energía transmitida por una perturbación a una de las ruedas no se transmite directamente a la otra rueda, ya que es absorbida en parte por el eje que las conecta. En cualquier caso, aunque la suspensión no es rígida totalmente, tampoco es independiente.

En las suspensiones semirrígidas existen principalmente dos modelos:

- Eje torsional: Las ruedas están unidas rígidamente a dos brazos longitudinales unidos a su vez por un travesaño que permite la torsión durante las perturbaciones no simétricas, dando estabilidad al vehículo. Esta configuración, a causa de la torsión del puente, permite una recuperación parcial del ángulo de caída con un alto efecto de estabilización, característica que junto al bajo peso, al bajo costo y al poco espacio que ocupan, ha hecho de esta configuración un tipo de suspensión más empleado en vehículos de gama media-baja. En la Figura 2.17 se ilustra un ejemplo de eje torsional montado en el modelo Golf de VW [13].

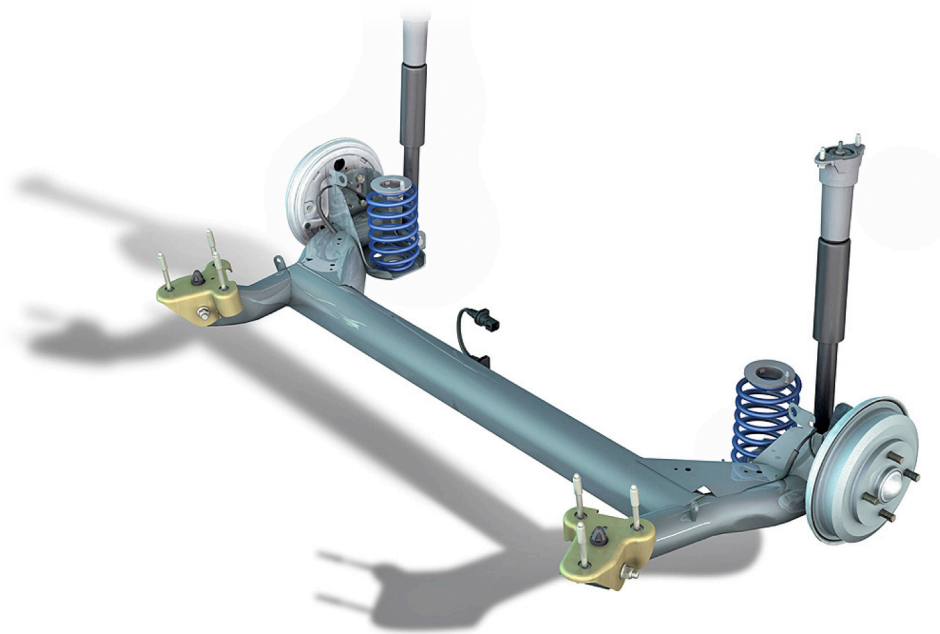


Figura 2.17 Suspensión de eje torsional

- Eje de Dion: Las ruedas están unidas mediante un eje rígido (“eje de Dion”) que permite movimientos longitudinales, limitados a su vez por tirantes de suspensión. Además están unidas a un eje longitudinal, anclado al bastidor, mediante dos semiejes que permiten el movimiento vertical de ambas ruedas de forma independiente, suponiendo un mecanismo de un dos semiejes unidos por un anclaje central con un grado de libertad. Este sistema tiene la ventaja frente al eje rígido de que se disminuye la masa no suspendida debido al poco peso del “eje de Dion” y al anclaje del grupo diferencial al bastidor, y mantiene los parámetros de la rueda prácticamente constantes gracias al anclaje rígido del tubo. En la Figura 2.18 se muestra una suspensión con “eje de Dion”.

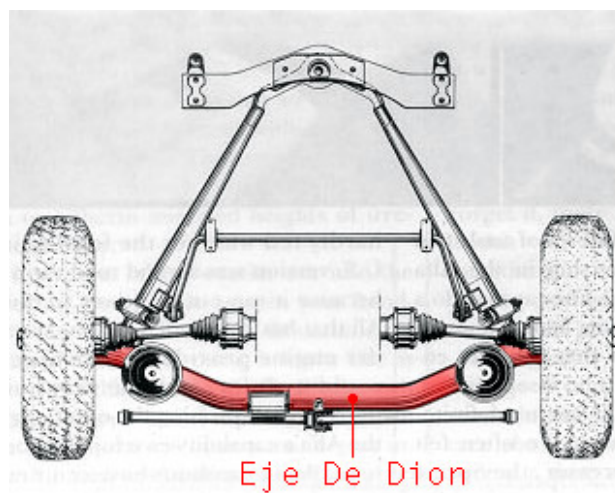


Figura 2.18 Esquema de una suspensión con eje de Dion

- Suspensión independiente

En esta configuración, las ruedas están conectadas al bastidor del vehículo mediante un sistema articulado que les permite desplazarse verticalmente sin afectar a la rueda opuesta. Esto genera mayor estabilidad, adherencia al suelo y confort.

Actualmente la suspensión independiente es la única que se utiliza en el eje directriz de vehículos turismos y en el eje de propulsión, que normalmente son el mismo. También se utiliza cada vez más en el eje posterior (en vehículos de tracción delantera), al presentar la ventaja de ser la configuración más óptima desde el punto de vista de confort y estabilidad, y al reducir, de forma independiente, las oscilaciones generadas por el pavimento sin transmitir las de una rueda a otra del mismo eje. Otra ventaja añadida de la suspensión independiente es que posee menor peso no suspendido que otros tipos de suspensión, por lo que las acciones transmitidas al chasis son menores.

Por otro lado, las suspensiones independientes tienen la desventaja de tener un mayor coste, presentar una mayor complejidad del sistema y para cargas elevadas esta suspensión puede presentar problemas. A pesar de ello, esta suspensión, cada vez tiene una mayor implantación en los vehículos automóviles, por ello, a continuación se describen las características más relevantes de los principales tipos de suspensión independiente, así como sus características frente al resto de suspensiones:

- Suspensión de eje oscilante: La peculiaridad de la suspensión mediante eje oscilante se encuentra en que el elemento de rodadura y el semieje son solidarios, de forma que el conjunto oscila alrededor de una articulación próxima al plano medio longitudinal del vehículo. Este tipo de suspensión no se puede usar como eje directriz, puesto que en el movimiento oscilatorio de los semiejes, altera notablemente la caída de las ruedas en las curvas.
- Suspensión de brazos tirados o arrastrados: La suspensión de brazos tirados (Fig. 2.19) realiza la unión de la rueda y el bastidor mediante una articulación por delante del eje, con un brazo que en su parte anterior está unido al bastidor y en la posterior a la rueda. En cualquier caso, las ruedas son tiradas o arrastradas por los brazos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería.

El elemento de union entre ambas ruedas puede ser más complejo que un brazo, un triángulo (dos puntos de unión al bastidor en lugar de uno) o bien varios brazos independientes. También pueden existir diferencias en el elemento elástico utilizado [13].

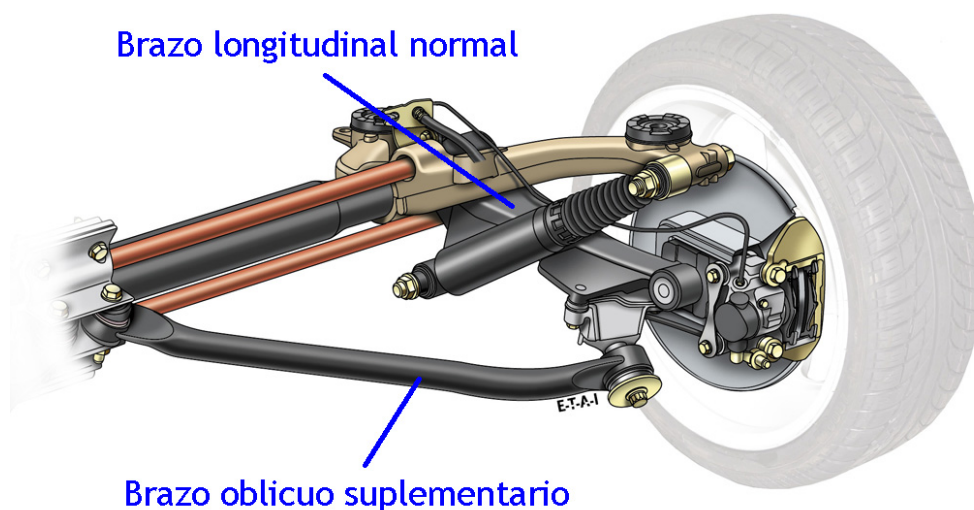


Figura 2.19 Suspensión de brazo tirado

- Suspensión McPherson: La suspensión McPherson (Fig. 2.20) fue desarrollada por Earle S. McPherson, ingeniero de Ford, del cual recibe su nombre. Está formado por dos brazos anclados al bastidor y oscilantes en la unión con la rueda, unidos entre sí por una barra estabilizadora o por un eje auxiliar. Es el sistema más compacto y liviano, y actualmente el más utilizado en el eje delantero de los automóviles. Permite un menor consumo de combustible y un menor número de componentes en el sistema, logrando así ahorro de espacio para el motor, y además hace posible montar un sistema de tracción delantera más sencillo. Todo esto supone que sea un sistema utilizado actualmente en muchos vehículos de hasta tamaño medio.

Es imprescindible que la carrocería sea más resistente en los puntos donde se fijan los amortiguadores y muelles, ya que las perturbaciones se transmiten de forma directa al chasis por los brazos de la suspensión, para cumplir el objeto de absorber los esfuerzos transmitidos [13].

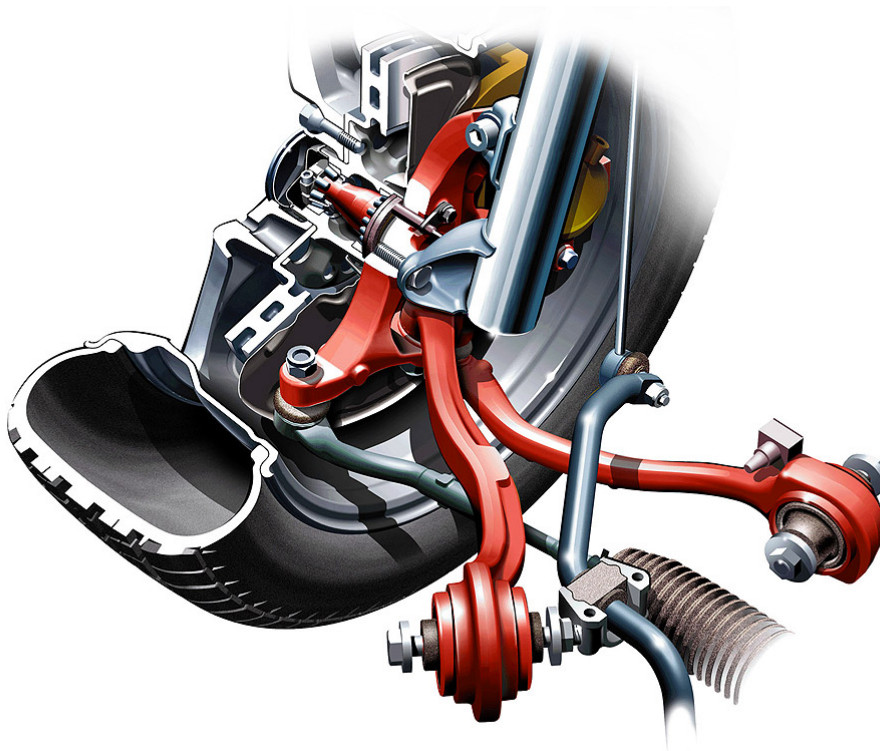


Figura 2.20 Suspensión McPherson

- Suspensión de paralelogramo deformable: La suspensión de paralelogramo deformable junto con la McPherson es la más utilizada en un gran número de vehículos, tanto para el tren delantero como para el trasero. Esta suspensión también se denomina suspensión por trapecio articulado o suspensión de triángulos

superpuestos, ya que está formada por dos elementos articulados paralelos y unidos desde el bastidor a la mangueta de la rueda, que pueden ser dos triángulos (siendo el montaje original) o un triángulo y otro elemento de unión (un brazo transversal, uno longitudinal, etc.), o incluso dos elementos de unión diferentes a un triángulo; que forman dos caras de un paralelogramo, las otras dos caras las forman el bastidos y la rueda. Se llama “deformable” por la deformación del paralelogramo cuando se experimenta una perturbación.

La evolución de este sistema de suspensión de paralelogramo deformable ha llegado hasta las actuales suspensiones llamadas multibrazo o *multilink*.

En la Figura 2.21 se observa una suspensión de paralelogramo deformable, que permite al vehículo una conducción mucho más adaptada a la carretera y una horizontalidad incluso en grandes giros [1, 3, 13].

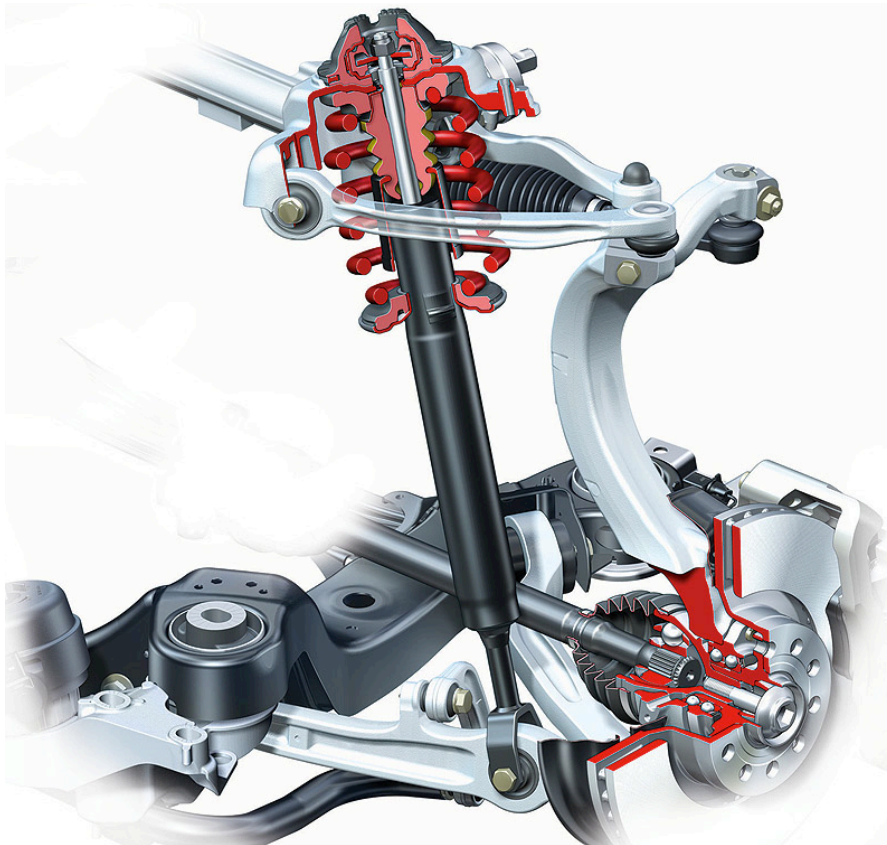


Figura 2.21 Suspensión de paralelogramo deformable

- Suspensiones multibrazo o *multilink*: Las suspensiones multibrazo (Fig. 2.22) se basan en el mismo concepto básico que sus precursoras, las suspensiones de paralelogramo deformable, es decir, el paralelogramo está formado por dos brazos transversales, la

mangueta de la rueda y el propio bastidor. La diferencia fundamental que aportan estas nuevas suspensiones, es que los elementos guía pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Gracias a esta variante, las multibrazo permiten modificar los parámetros de la rueda, la caída o la convergencia, de la forma más apropiada, de cara a la estabilidad en las distintas situaciones.

Las suspensiones multibrazo se pueden clasificar en dos grupos fundamentales:

- Suspensiones multibrazo con elementos de guía transversales u oblicuos, con funcionamiento similar al de las suspensiones de paralelogramo deformable.
- Suspensiones multibrazo que además, disponen de brazos guía longitudinal con un funcionamiento que recuerda a los sistemas de suspensión de ruedas tiradas por brazos longitudinales [3, 13].

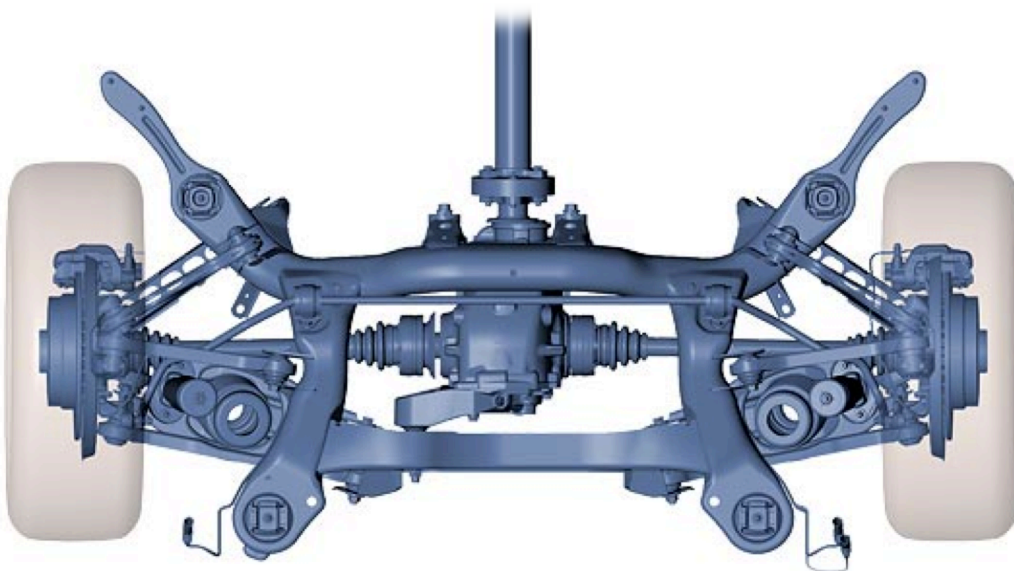


Figura 2.22 Suspensión multibrazo

- Suspensión conjugada

Se dice que un sistema de suspensión está conjugado cuando las ruedas delanteras y traseras, del mismo lado, están intercomunicadas, de forma que cuando una rueda sobrepasa un obstáculo la rueda del mismo lado soporta también los esfuerzos. Este tipo de funcionamiento hace que se tengan las ventajas de las suspensiones independientes, pero consigue mejorar su eficiencia.

La suspensión conjugada consigue una gran reducción del cabeceo del coche, que se mantiene más horizontal, lo que se traduce, para los ocupantes, en una mayor comodidad y seguridad. Dentro de este sistema la intercomunicación entre las ruedas de un mismo lado, puede hacerse mediante una

unión hidráulica o bien mecánica:

- Suspensión conjugada de unión mecánica por muelles: Es utilizada por Citroën en vehículos pequeños, y consiste en unir los brazos de la suspensión de las ruedas de cada lado, mediante un cilindro colocado longitudinalmente en el lateral unido al bastidor, con unos apoyos que le permiten deslizar. Entre el cilindro y los apoyos hay unos muelles de láminas helicoidales cónicos, y en el interior otros cilíndricos helicoidales a los que se sujetan las bielas, que se unen a los brazos de la suspensión.
- Suspensión conjugada de unión hidráulica (*Hydrolastic*): Por cada rueda se coloca un elemento hidráulico que hace la función de muelle y amortiguador. Estos elementos van fijos a la carrocería, unidos a la rueda mediante los brazos de suspensión y comunicados los de cada lado, mediante una tubo con el fin de que el fluido de trabajo pase de un elemento a otro.

2.3.2.2 Según sistema de control

Actualmente la clasificación según el sistema de control se divide en tres grandes grupos: suspensión pasiva, activa y semiactiva [3, 4, 7].

- Suspensión pasiva

En cuanto al sistema de control, los sistemas de suspensión compuestos únicamente por los elementos descritos en los apartados anteriores se conocen como sistemas pasivos. Basicamente estos sistemas no permiten que el conductor varíe a su gusto las características de los elementos que la componen, ni que ellos mismos se adapten a las condiciones de la marcha. Hoy en día su uso está muy generalizado debido a que su coste resulta mucho más reducido al compararlo con otros sistemas más sofisticados, no obstante, presentan una difícil adecuación entre los parámetros de confort, eficacia y seguridad. Esto es debido a la difícil búsqueda de un equilibrio entre los tres parámetros. Para aumentar la eficacia del sistema es necesario que este absorba la mayor parte de la energía que se transmite, de forma que la suspensión debe hacerse más ágil y blanda, lo que supone un mayor movimiento de la masa suspendida y esto se traduce en menor confort; además para aumentar la seguridad, se debe dar prioridad al constante contacto del neumático con el suelo, y para ello endurecer la suspensión, lo que iría en contra de la eficacia y se traduciría además en la transmisión de mayor energía al bastidor, y con ello una reducción del confort.

Este problema se soluciona con ingeniosas combinaciones de elementos elásticos y de amortiguación que se instalan actualmente en muchos vehículos comerciales. En la Figura 2.23 se

muestra el esquema de una suspensión pasiva.

- Suspensión activa

Cuando se busca una mayor exigencia al sistema de suspensión, y que se tenga en cuenta factores como el estado de la calzada, velocidad, comportamiento en la conducción, etc; es necesario la existencia de un sistema de suspensión adaptativo, independiente para cada rueda, y que sea rápido y eficaz. Para conseguir este propósito se integran dentro de los automóviles sensores capaces de medir e identificar los factores que afectan a la suspensión de los vehículos, sistemas de transmisión de estos datos y actuadores que tengan una respuesta en función de la entrada tomada por los primeros. Los actuadores son dispositivos capaces de transformar una entrada de energía hidráulica, neumática o eléctrica, en una salida generalmente mecánica, que realice un efecto dentro del proceso automatizado.

El sistema de suspensión con control mediante actuadores proporciona un continuo seguimiento del coche cuando este se inclina debido a deceleraciones, aceleraciones, o en una trayectoria curva. De esta manera se pueden corregir los problemas relacionados con el posicionamiento del vehículo para evitar que se pierda el control sobre el mismo. Normalmente constan de tres componentes principales, que son: los sensores del vehículo, un microprocesador y un complejo sistema de servomecanismos hidráulicos. El servomecanismo hidráulico es un mecanismo dotado de retroalimentación automática que, mediante el sistema hidráulico, permite corregir la inclinación del vehículo en las situaciones descritas en el párrafo anterior. El microprocesador a su vez, recupera la información proporcionada por los sensores determinando si el coche se encuentra en una posición correcta y enviando, de esta manera, la información oportuna a los servomecanismos hidráulicos. Generalmente son necesarios varios conjuntos de sensores. Un sensor de nivel situado en cada rueda para medir de manera óptima las variaciones del peso del vehículo, cinco giróscopos para medir las variaciones en la aceleración y deceleración del vehículo y, finalmente, cuatro sensores hidráulicos para medir las variaciones de presión registradas durante la frenada. El sistema electrónico se encarga de calcular las fuerzas de balanceo y cabeceo, recibiendo la información de los sensores que miden 100 veces por segundo el movimiento y aceleraciones del vehículo, y posteriormente obtiene las fuerzas de compensación que se aplican mediante los actuadores. Un ejemplo de este tipo de suspensión activa es el *Active Body Control* (ABC) de Mercedes-Benz.

Este modelo de suspensión es de lazo cerrado y en consecuencia los parámetros de salida del actuador quedan registrados en un ordenador central para formar parte del proceso de automatización. De esta manera, la suspensión activa es capaz de absorber, almacenar y disipar energía de forma automatizada y adaptativa.

Las ventajas de este sistema son el alto nivel de seguridad que aportan, el confort y la automatización. No obstante para valorar el sistema de suspensión activa basta con observar el tiempo de respuesta, ya que, cuanto menor sea este, mayor será la capacidad de reacción de la suspensión. Este

tiempo de respuesta vendrá determinado por el ancho de banda del sistema, por tanto, si el ancho de banda abarca un rango de frecuencias de hasta 3 ó 5 Hz, el sistema de suspensión se denomina de baja frecuencia, mientras que si el rango abarca frecuencias más elevadas, hasta 10 ó 12 Hz, se denomina de alta frecuencia. Por tanto, si se compara el sistema de suspensión activa con el sistema de suspensión pasiva, el segundo funciona para todo el rango de frecuencias, y la suspensión activa tiene la desventaja del gran coste que supone instalar el sistema para alta frecuencia y por ello no se comercializa en los vehículos de serie, debido además a que el consumo de energía es demasiado elevado. En la Figura 2.24 se muestra el esquema de una suspensión activa.

- Suspensión semiactiva

La suspensión semiactiva fue propuesta en la década de los 70, para solucionar los problemas de sobre coste que presentaban las suspensiones activas, ya que, estas suspensiones incorporan elementos activos para controlar las bajas frecuencias y pasivos para las altas frecuencias.

En los últimos años se han desarrollado diferentes sistemas que han permitido mejorar considerablemente el comportamiento dinámico de la suspensión mediante el empleo de sistemas de amortiguación que tratan de adaptarse a los rangos óptimos de amortiguamiento en función de las condiciones de la calzada, dando lugar a la amortiguación adaptativa.

Las suspensiones adaptativas basicamente pueden variar su coeficiente de amortiguamiento variando, de esta forma, la fuerza del amortiguador. Su cada vez más extendida aplicación se debe a que, el problema fundamental de los elementos amortiguadores de las suspensiones es el equilibrio entre absorber las perturbaciones que la calzada transmite al vehículo y mantener siempre el contacto de la rueda con la superficie de rodadura. En tal circunstancia, cuando las perturbaciones pueden producir fenómenos de resonancia en la masa suspendida, requieren grandes fuerzas de amortiguación, en cambio, cuando las perturbaciones son pequeñas, son necesarias fuerzas mas menores. Esto es basicamente lo que se pretende conseguir con la suspensión adaptativa.

La forma en la que se puede variar la fuerza del amortiguador depende del diseño realizado. Para el amortiguador que se trata en este proyecto, el amortiguador MR, el diseño permite variar el coeficiente de amortiguamiento mediante la aplicación de un campo magnético al fluido de trabajo, esto supone un cambio en la densidad del fluido y con ello, en último caso, de la fuerza del amortiguador. En general los diseños constan de 4 amortiguadores, dispuestos uno en cada rueda, sensores de altura para controlar los movimientos de la masa suspendida, una unidad de control y de sensores en el sistema de frenos, volante de dirección y tacómetro. El sistema de procesamiento de los datos es de lazo cerrado, como en el caso anterior. La información procedente de los sensores es procesada por una centralita, la cual, en función de sus mapas de memoria, decide la fuerza de amortiguación ideal para el confort, la estabilidad o el control de altura. En la Figura 2.25 se muestra un esquema de una suspensión semiactiva.

Algunos ejemplos de este sistema de suspensión adaptativa son el sistema *Airmatic dual Control* de Mercedes Benz, el sistema *Continuously Controlled Chassis Concept* by Volvo ó el sistema *Electronic Damping Control* de BMW.

Por otra parte cabe destacar dentro de este sistema de suspensión la creciente incorporación de elementos controlados mediante materiales con “efecto memoria”. También cobran especial importancia los fluidos magneto-reológicos, que pueden modificar su viscosidad ante la presencia de distintos campos magnéticos, y que normalmente están formados por microesferas de acero de diversos tamaños mezcladas en el seno de un fluido compuesto a base de hidrocarburos sintéticos. Este tipo de suspensión se verá de forma más detallada en el siguiente capítulo.

Las principales ventajas de la suspensión semiactiva son:

- Una marcha ajustable, optimizada para obtener el mayor rendimiento en la conducción y el confort.
- La suspensión se ajustará automáticamente según las condiciones de la carretera.
- El mismo dimensionado comparado con los sistemas de suspensión tradicionales.

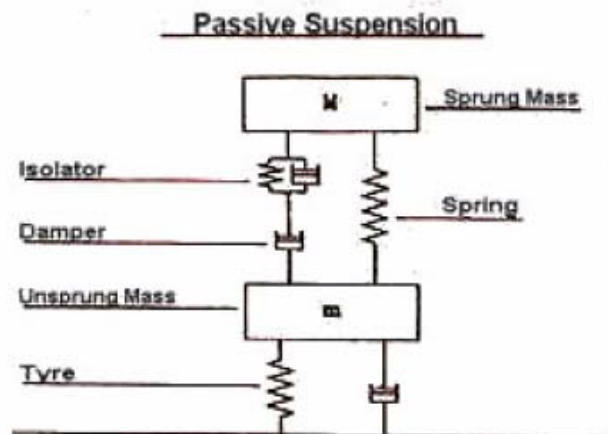


Figura 2.23 Esquema de una suspensión pasiva

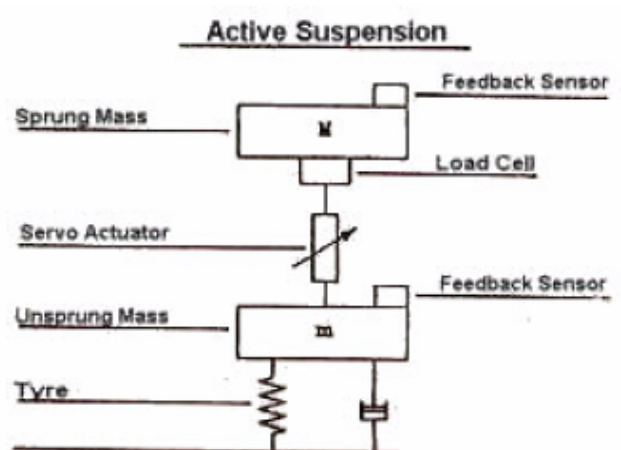


Figura 2.24 Esquema de una suspensión activa

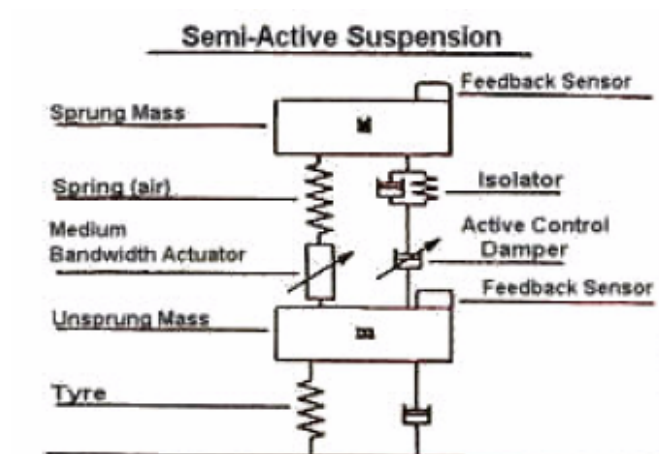


Figura 2.25 Esquema de una suspensión semiactiva

CAPITULO 3

FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

3.1 Introducción

3.1.1 La reología

Se denomina reología, palabra introducida por Eugene Bingham en 1929, al estudio de la deformación y el fluir de la materia. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos y la Real Academia Española define reología como el estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos. Una definición más moderna expresa que la reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales; es por esto que estudia la deformación de sustancias bajo el efecto de fuerzas, y se limita, normalmente, a materiales que no obedecen la ley de viscosidad de Newton y la Ley de Hooke, que son ecuaciones que relacionan la velocidad de deformación del fluido y el esfuerzo cortante que provoca esta deformación. Las ecuaciones derivadas de la reología no dependen directamente de la velocidad de deformación como en el caso anterior si no que son dependientes de los valores de esfuerzo cortante y de las viscosidades de los fluidos [14].

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de la propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte).
- Coeficientes de esfuerzos normales.
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio).
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento viscoelástico lineal).
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal.

Las relaciones que guían la interdependencia de estos factores son altamente complejas a la par que importantes, ya que de ellas depende la optimización del desarrollo de estos fluidos para diferentes aplicaciones. De esta manera, en la Figura 3.1, se muestra el esfuerzo de cortadura sobre un fluido magneto-reológico en función de la densidad de flujo magnético aplicado a una velocidad de corte elevada. Se observa como con el aumento de flujo magnético aplicado, la orientación de las partículas de hierro en suspensión produce un aumento de la desidad y con ello, del esfuerzo de cortadura necesario para mentener constante la velocidad de cortadura.

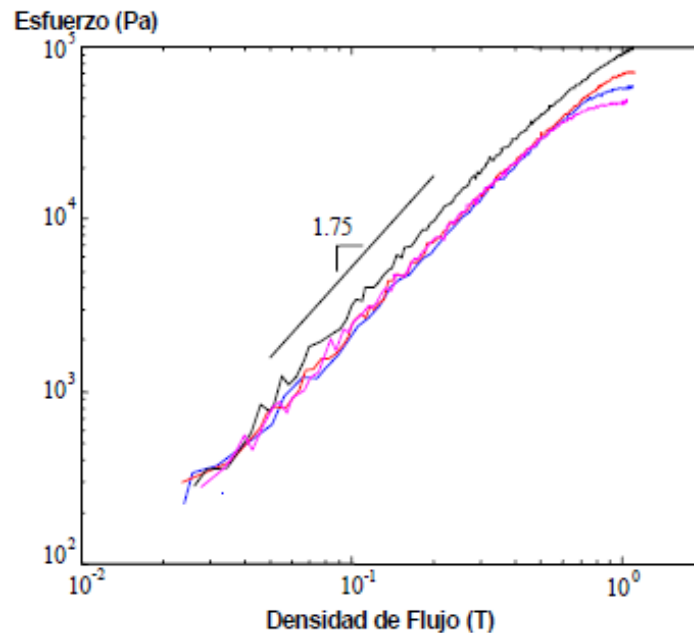


Figura 3.1 Gráfica de esfuerzo-densidad de flujo magnético, a velocidad de cortadura elevada

Esta ciencia ha tenido y tiene cada vez mayor importancia en ciertos campos tecnológicos e industriales en general, algunos de ellos son el control de calidad de los alimentos, la textura y consistencia de productos (este control se realiza en la propia línea de producción), industrias de pegamentos (el estudio de su plasticidad, de la forma de fluir dentro del recipiente que lo contiene, etc.), producción de pinturas (una pintura debe ser esparcida de forma fácil pero sin que escurra, etc.) Tras esta introducción teórica, en el siguiente apartado se hace una síntesis de la evolución histórica de la reología.

3.1.2 Evolución histórica

En el contexto histórico se empieza a hablar de reología a partir de la segunda mitad del siglo XVII, época en la que se dan a conocer los conceptos de fluidos viscosos ideales y del sólido elástico. De esta manera, en 1687 Newton definió el líquido viscoso, que posteriormente fué denominado como fluido newtoniano, en el que la energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor sin dar lugar a la recuperación parcial de la forma originaria del mismo. Por otra parte, en 1678 Hooke enunció la ley que relaciona el esfuerzo cortante con el módulo de rigidez y la deformación propia del material. Esta ley establece que al aplicar una carga sobre un cuerpo sólido, este se deformará siempre y cuando no se supere el límite de elasticidad, y esta deformación se mantendrá hasta que cese el esfuerzo aplicado. A partir de este momento, se comenzó a estudiar la “elasticidad de los materiales”, que actualmente se define como la propiedad de los mismos que les hace recuperar su forma y tamaño original cuando

cesan los esfuerzos que sobre ellos actúan.

Hasta hace aproximadamente tres siglos, los estudios relacionados con el campo de la reología tenían sus bases fundamentadas en las leyes de Newton y de Hooke. No obstante, este fundamento se desestimó a partir del siglo XIX cuando la comunidad científica comenzó a poner en duda la validez universal de estas dos leyes. De esta manera, la reología moderna estudia el comportamiento de compuestos complejos, que presentan propiedades viscoelásticas. Finalmente el término de reología fue acuñado como tal en 1929 por Eugene Cook Bingham, para definir la rama de la física que tiene por objeto el estudio de la deformación y/o flujo de la materia [14].

3.2 Materiales inteligentes

Los materiales inteligentes, activos, o también denominados multifuncionales son materiales capaces de responder de modo reversible y controlable ante diferentes estímulos físicos o químicos externos, modificando alguna de sus propiedades. Por su sensibilidad o actuación, estos materiales pueden ser utilizados para el diseño y desarrollo de sensores, actuadores y productos multifuncionales, así como, poder también llegar a configurar estructuras y sistemas inteligentes de aplicaciones múltiples. En este caso, las estructuras inteligentes son, por ejemplo, aquellas que gracias a la combinación de estos materiales son capaces de autoevaluarse y modificarse para adaptarse a las condiciones que se les ha marcado como óptimas o correctas. Algunos de estos materiales son conocidos desde hace muchos años, y otros, la mayoría, son de reciente aparición. Se manifiestan en diferentes naturalezas, inorgánicas, metálicas y orgánicas, y su comportamiento es muy diverso siendo sensibles a una amplia variedad de fenómenos físicos y químicos. Actualmente, su importancia surge gracias a las nuevas tecnologías, como la microelectrónica, y la posibilidad de diseñar y sintetizar estructuras orgánicas poliméricas con propiedades activas predefinidas; por ejemplo, hasta hace pocos años todos se han maravillado ante los displays de cristal líquido (LCD) presentes en pantallas planas de ordenador, teléfonos móviles, etc., pero ya ha comenzado su cuenta atrás con la aparición de los OLED (*Organic Light-Emitting-Diode*), pantallas construidas con polímeros multicapa que emiten luz ante pequeños estímulos eléctricos, permitiendo diseños más ligeros y flexibles. Juntando tecnología e imaginación, ya se comercializan con estas nuevas pantallas vídeo cámaras (Kodak Easyshare LS633, Fig. 3.2), así como lámparas planas para sistemas de seguridad y señalización, piezas plásticas de interior de vehículo con luz propia, etc. Siendo imparable el desarrollo de nuevos productos en base a los materiales activos [3, 14].

Existen muchos materiales, englobados dentro de los que se han llamado inteligentes, que han supuesto un gran avance en distintos campos de la ingeniería gracias a sus aplicaciones. Algunas de estas aplicaciones están recogidas en el siguiente apartado.



Figura 3.2 Pantalla de polímeros multicapa del modelo Kodak Easyshare LS633

3.2.1 Materiales fotoactivos y cromóactivos

Los materiales fotoactivos actúan emitiendo luz. En el caso de los electroluminiscentes, cuando son alimentados con impulsos eléctricos, emiten luz. Los fluorescentes por otro lado devuelven la luz con mayor intensidad y los fosforescentes almacenan la energía y la emiten después de cesar la fuente de luz inicial. Estos últimos son utilizados en la actualidad sistemas de señalización y seguridad.

Los fotoluminiscentes se pueden explicar como una estructura formada por átomos, de los cuales se emite energía tras ser cargados, como una batería, con la energía transmitida por la luz. Este fenómeno consiste en la exposición de dicho átomo a una fuente de energía luminosa, el electrón de valencia, o electrones de valencia, saltarán a niveles de energía superior, inducidos por el aumento de esta; una vez desaparece la fuente, pueden pasar dos cosas, que el material comience a emitir luz de forma constante y duradera porque el electrón halla cambiado de spin (materiales fosforescentes, Fig. 3.3), o que emitan una luz intensa y poco duradera en el caso de que no exista cambio de spin (materiales fluorescentes, Fig. 3.4). Con otras fuentes de energía, por ejemplo la electricidad, ocurriría lo mismo, dando lugar a materiales electroactivos.

Los materiales cromóactivos se pueden clasificar en: fotocromáticos, termocromáticos y electrocromáticos. Lo que ocurre es que los pigmentos fluorescentes producen luz visible o invisible, como resultado de una luz incidente de longitud de onda corta (rayos X, rayos UV, etc.). Son blancos, o de color claro a la luz del día, en cambio, irradian un intenso color cuando se les expone a una radiación UV, el efecto cesa tan pronto como desaparece la fuente de excitación.



Figura 3.3 Fenómeno de fosforescencia

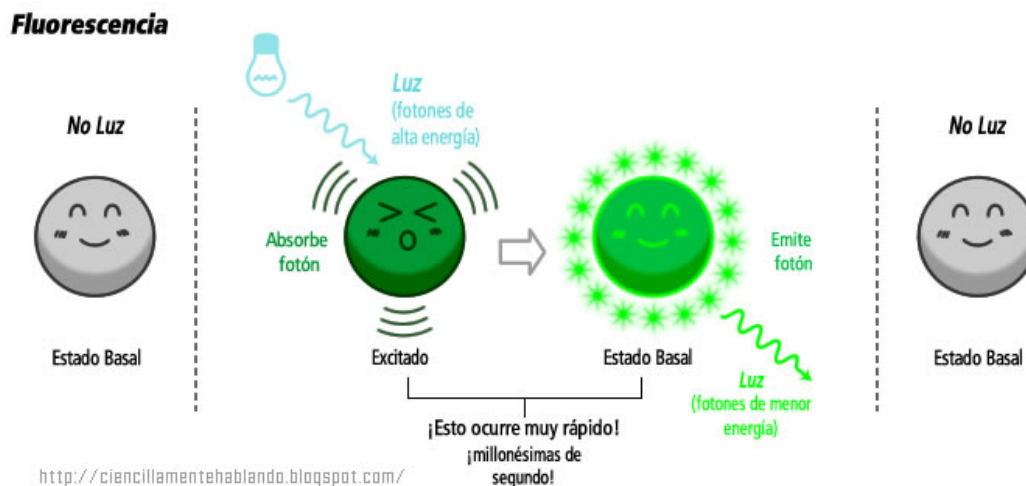


Figura 3.4 Fenómeno de fluorescencia

Los materiales electroluminiscentes son aquellos que producen luz brillante de diferentes colores cuando son estimulados electrónicamente, por ejemplo con corriente AC. Mientras emiten luz no producen calor y se aplican a sistemas de señalización. Emiten luz fría y gracias a su disposición en forma de film (lámparas planas) están siendo combinados en piezas multicapa mediante técnicas como IMD (*In Mold Decoration*) para realizar piezas 3D que emiten luz propia [14].

3.2.2 Materiales con memoria de forma

El efecto de memoria de forma es la capacidad de un material para cambiar la forma cuando se le

aplica un estímulo externo, por ejemplo, un cambio de temperatura o un campo magnético. El término de materiales con memoria de forma agrupa a cuatro clases diferentes, según la naturaleza, o del material en sí, o del estímulo externo al que responden. Las cuatro clases son:

- Aleaciones con Memoria de Forma (*Shape Memory Alloys, SMAs*).
- Cerámicas con Memoria de Forma (*Shape Memory Ceramics*).
- Polímeros con Memoria de Forma (*Shape Memory Polymers, SMPs*).
- Aleaciones Ferromagnéticas con Memoria de Forma (*Ferromagnetic Shape Memory Alloys, FSMAs*).

En la Figura 3.5 se muestra un esquema del comportamiento de un material con memoria de forma.

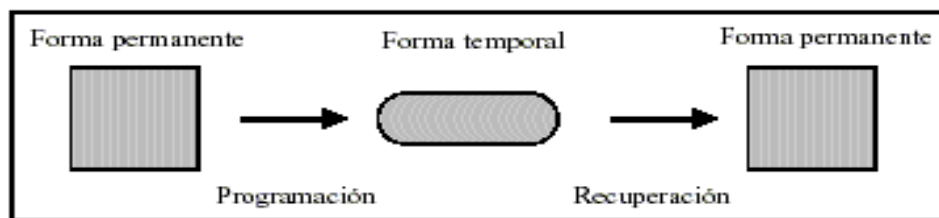


Figura 3.5 Esquema del comportamiento de un material con memoria de forma

3.2.3 Materiales piezoelectricos y electrostrictivos

Los materiales piezo eléctricos o electrostrictivos son capaces de adquirir un campo eléctrico cuando se les somete a esfuerzos mecánicos. Este efecto aparece como consecuencia del esfuerzo producido monotómicamente, que tiende a crecer a medida que se aplica el campo eléctrico. No obstante, también se produce el efecto contrario, ya que estos materiales tienden a deformarse cuando se les aplica un determinado voltaje (este efecto es conocido como efecto de electrostricción). Además existen otros materiales, los magnetostrictivos, que pueden responder a campos magnéticos de la misma manera que los piezoeléctricos lo hacen ante campos eléctricos [1, 14].

3.2.4 Fluidos electrorreológicos y magnetorreológicos

Los fluidos magneto-reológicos son suspensiones acuosas de microesferas superparamagnéticas que contienen gránulos de magnetita dispersos. Estas partículas no tienen remanencia, ni histéresis magnética. A esta solución se añade un surfactante (sustancia que reduce la tensión superficial de un líquido) para estabilizar la suspensión. Según el tamaño de las partículas que están disueltas en el fluido pueden ser llamados ferro-fluidos, si sus partículas son de 3 a 15 nm, y fluidos magneto-reológicos, si

están entre 0.05 y 8 μm . Los fluidos magnéticos son materiales que responden a la aplicación de un campo con un cambio en su comportamiento reológico. Es decir, bajo la acción de un campo magnético constante las partículas adquieren momento dipolar, que genera una fuerza atractiva entre ellas, la cual produce la agregación de las partículas en forma de collares de cuentas, alineados con el campo magnético (Fig. 3.6), y por esta razón se da el drástico cambio en su densidad, que se manifiesta mediante el desarrollo de un esfuerzo producido monoatómicamente, que crece con el campo aplicado.

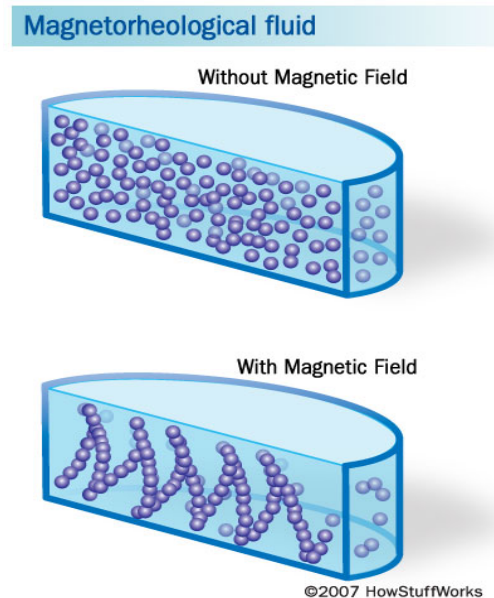


Figura 3.6 Magnetización de un fluido magneto-reológico

Las estructuras columnares paralelas al campo aplicado que se han formado restringen el movimiento del fluido dando lugar a un incremento de las características viscosas de la suspensión, teniendo efectos en el campo de velocidades, y por tanto, provocando que en la aplicación en amortiguaciones, sea necesaria una mayor fuerza para provocar el desplazamiento del embolo que oprime el fluido, el cuál debe salir por los orificios, con un campo de velocidades reducido (este efecto se muestra en la Figura 3.7). La energía mecánica necesaria para hacer fluir la solución a través de las cadenas se incrementa conforme crece el campo aplicado, dando como resultado un esfuerzo dependiente del campo [7].

Las propiedades reológicas de este tipo de fluidos están determinadas por las siguientes características:

- Concentración y densidad de las partículas.
- Distribución de forma y tamaño de las partículas.

- Las propiedades del fluido portador.
- Aditivos adicionales.
- La intensidad de campo magnético aplicado.
- La temperatura.

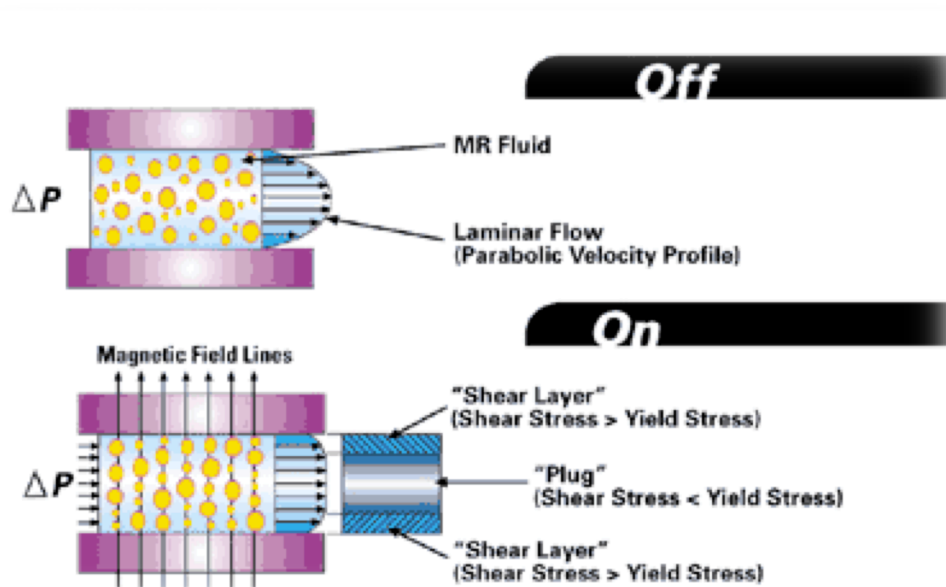


Figura 3.7 Campo de velocidades, influido por un campo magnético, en un fluido magneto-reológico

3.3 Aplicaciones

Hoy en día, se pueden encontrar aplicaciones de los materiales inteligentes en numerosos campos y aplicaciones industriales. De entre estas numerosas aplicaciones, destaca su uso en elementos sensores o actuadores.

Los sensores se fabrican con este tipo de materiales empleando como señal de entrada distintos campos mecánicos (dependiendo del material, así como de sus respuestas ante estímulos), y en base a ellos, los materiales corresponden con señales de salida que son fácilmente medibles y que, generalmente van ligadas a campos eléctricos que generan una diferencia de potencial o campos que inducen corriente eléctrica.

Por su parte, los actuadores emplean como señales de entrada campos eléctricos, térmicos o magnéticos, que mediante las propiedades del material activo son transformadas en una señal de salida mecánica, como un campo de desplazamientos, deformaciones o esfuerzos, con la consiguiente generación de una fuerza que puede ser empleada en realizar un cierto trabajo.

De todos los materiales inteligentes, los más utilizados son los piezoeléctricos y magneto-

estrictivos, ya que pueden operar como sensores o como actuadores. Por otra parte, los fluidos reológicos se emplean en amortiguadores activos para vibraciones, tanto periódicas, como no periódicas, de frenos, embragues, estructuras, etc. Entre la gran cantidad de aplicaciones existentes en la actualidad en los siguientes apartados se desarrollan algunos ejemplos dentro de diferentes campos de la ingeniería [1, 3, 6].

3.3.1 Robótica

Con el avance de la tecnología, se están construyendo herramientas con las que alcanzar la optimización de ciertas funciones. Estas herramientas son, entre otras, la robótica que emula las capacidades del ser humano. Los movimientos propios de los seres vivos deben ser amortiguados y a la vez con gran capacidad para soportar esfuerzos de carga y descarga, torsión, etc. Es por esto que en este campo son necesarios los fluidos reológicos para poder amortiguar las vibraciones producidas. Es posible que, pese a que la aplicación de los fluidos MR sea típicamente la de atenuar vibraciones, se consigan robots en cuyas “venas” circule fluido MR y sean capaces de articularse con movimientos muy parecidos a los de los humanos. Además, como ya se ha comentado anteriormente, el creciente uso de los materiales inteligentes en aplicaciones de sensores y actuadores, exige la implantación de esto en un campo como el de la robótica, necesitado de estos elementos. Por todo esto, la aplicación de los materiales inteligentes en este campo tiene realmente mucho potencial.

3.3.2 Obra civil

Como se indicó anteriormente en el apartado 3.3, una aplicación importante de los fluidos magneto-reológicos es la atenuación de las vibraciones y dentro de ella una de las más importantes en el mundo de la construcción, es la atenuación de la energía transmitida por terremotos o ráfagas de viento. Mediante un sistema de sensores se recoge la información de los desplazamientos producidos y de los esfuerzos a los que se someten las estructuras y, posteriormente, un sistema de actuadores genera un campo magnético que varía las constantes de amortiguación del sistema de amortiguadores ligado a la misma estructura. En Japón y China ya se ha instalado estos dispositivos en la construcción de edificios y puentes, específicamente el Museo Nacional de Ciencias Emergentes de Japón, y el puente del Lago Dong Ting (Fig. 3.8) en China. Hay que tener en cuenta que pese a que estos sistemas son parecidos a los que se pueden montar en las suspensiones de un vehículo, debido a que se necesita una potencia mucho mayor, pueden ser estructuralmente diferentes.



Figura 3.8 Puente sobre el Lago Dong Ting

3.3.3 Suspensión de asientos para vehículos de trabajo pesado

El empleo de estos sistemas de amortiguación en asientos de vehículos pesados, permite un mayor control en tiempo real de la posición óptima para la conducción, para ello la unidad de control modifica la intensidad del campo magnético en función del peso del conductor, de los niveles de choque y de las vibraciones debidas a las irregularidades del terreno. La Figura 3.9 muestra el esquema básico de un un amortiguador empleado en un sistema de suspensión semiactiva en vehículos de carga para travesías largas.

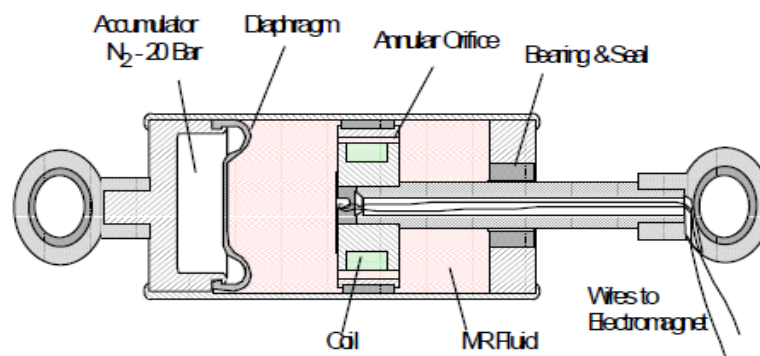


Figura 3.9 Esquema de un amortiguador instalado en un equipo de gran tonelaje

3.3.4 Amortiguación de vibraciones industriales

En los trabajos industriales existen gran numero de máquinas en las que las vibraciones que se transmiten conllevan un gran deterioro de la propia máquina, lo que significa que el resultado y la durabilidad de los procesos industriales se ve directamente afectado, por ello resulta importante el empleo de dispositivos para evitarlo en la medida de lo posible. Los amortiguadores de fluido viscoso aprovechan las propiedades de este para disipar la energía de la vibración. Es decir como ya se ha explicado, el control de un mayor rango de amplitudes de las vibraciones es más sencillo mediante fluidos reológicos, ya que al poder amortiguar un amplio rango de vibraciones es posible adaptarse a muchos cambios, teniendo así un sistema mucho más flexible. En la Figura 3.10 se ilustra un esquema de este tipo de amortiguadores.

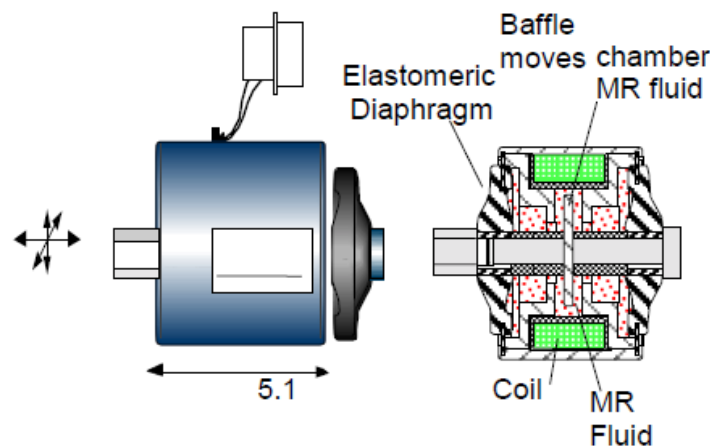


Figura 3.10 Esquema de un amortiguador Rheonetic RD-1013-1

3.4 Descripción del amortiguador magneto-reológico

La historia de la aplicación de fluidos reológicos en la amortiguación de vehículos automóviles comienza en el siglo XX. El fabricante de componentes para la automoción Delphi, fue el primero en desarrollar un sistema de amortiguación basado en amortiguadores reológicos para un automóvil. Este sistema de suspensión fue presentado en sociedad en el salón de Fráncfort en 1999. El sistema desarrollado por Delphi consistía en una suspensión semiactiva con amortiguador de fluido magneto-reológico llamado "*Magnetic Ride*". Posteriormente el sistema *Magnetic Ride* se fue implantado hasta que últimamente se monta en turismos de alta gama como pueden ser el modelo R8 de Audi (Fig. 3.11) o el modelo Ferrari 599 GTB Fiorano.



Figura 3.11 Modelo R8 de Audi con *Magnetic Ride*

La diferencia respecto a otros sistemas de suspensión se encuentra en su interior, el fluido de trabajo del amortiguador que contiene aproximadamente un 40% de partículas metálicas en suspensión. El sistema *Magnetic Ride*, está compuesto por el fluido magneto-reológico, bobinas electromagnéticas, sensores que detectan tanto el desplazamiento de la suspensión como la aceleración transversal y longitudinal, por una unidad de mando y por los elementos pasivos. El modelo de amortiguador se muestra en la Figura 3.12, donde se puede observar el pistón, el fluido de trabajo, el acumulador y la bobina [13].

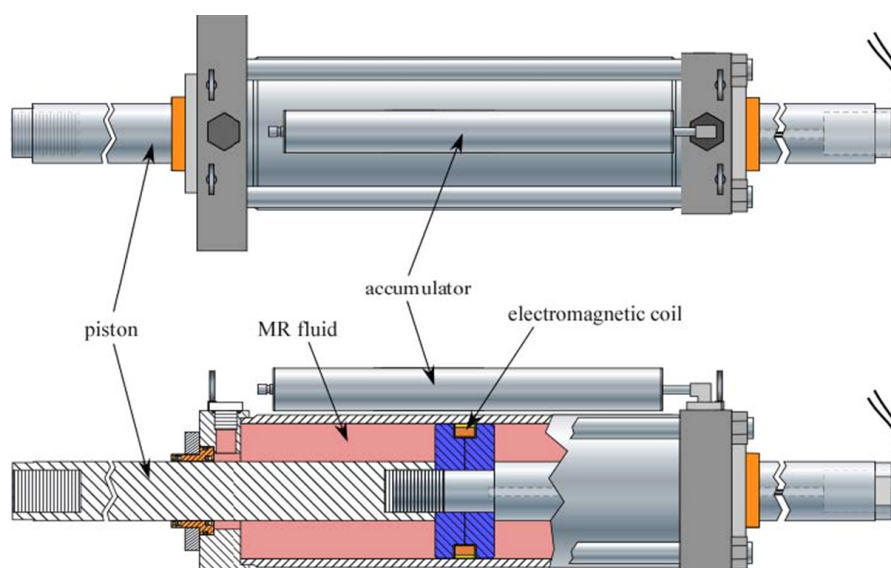


Figura 3.12 Esquema de un amortiguador MR

La consistencia de la suspensión depende en gran medida de la intensidad del campo magnético que se aplique. El modo de funcionamiento del sistema *Magnetic Ride*, es de la siguiente manera: los sensores de desplazamiento de la amortiguación mandan señales a la unidad de mando que aplica una intensidad de corriente a cada amortiguador dependiendo de la señal que previamente ha recibido de la unidad de mando. Esta intensidad de corriente la recibe la bobina electromagnética del amortiguador, variando el campo magnético en relación con la intensidad recibida y por lo tanto variando la densidad y viscosidad del fluido reológico. Los valores de la densidad del fluido reológico y, por lo tanto, la constante de amortiguamiento de la suspensión, dependiendo de la conducción, cambian unas 1000 veces por segundo, lo que hace ajustar inmediatamente la suspensión a las necesidades de la conducción.

No solamente se adapta a las necesidades de la conducción dependiendo del suelo, ya que su sensor de aceleración hace que se adapte a las aceleraciones, frenadas y a los movimientos oscilatorios de la carrocería. En el caso de una frenada brusca, eleva la dureza mediante el campo magnético, de la suspensión delantera aumentando así la estabilidad. En el caso de que se produzca una aceleración aumenta la dureza de la suspensión trasera del vehículo evitando el hundimiento de esta parte y también evita el balanceo producido al pasar por una curva aumentando la dureza de los amortiguadores que van por el exterior de la curva.

Actualmente, este tipo de suspensión se monta en vehículos de alta gama como pueden ser: Chevrolet Corvette, Audi R8 y TT, Cadillac Seville ó Ferrari 599 GTB y California.

Entre las ventajas de este sistema de amortiguación destacan que es diez veces más rápido que el amortiguador convencional, que los sensores pueden modificar la viscosidad del líquido hasta 1000 veces por segundo, que no requiere grandes mantenimientos, la posibilidad de control independiente en cada una de las cuatro ruedas del vehículo y su simplicidad mecánica al no disponer de válvulas ni de electroválvulas. En contrapartida se tiene el sobrecoste que implica la adquisición de una tecnología que aún no está totalmente implantada y desarrollada, el alto coste de los dispositivos electrónicos que la gobiernan y que es necesario un aporte energético (20 V) frente a los amortiguadores convencionales, que no necesitan una fuente externa para su funcionamiento.

CAPITULO 4

MODELOS MATEMÁTICOS DE UN AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO

4.1 Introducción: modelos matemáticos

En los capítulos anteriores se ha expuesto una introducción al concepto de suspensión y a los materiales inteligentes, para finalmente describir el amortiguador magneto-reológico en el apartado 3.4. En este capítulo se introducen algunos de los modelos matemáticos que definen el comportamiento físico de este tipo de amortiguadores. Los tres modelos más comunmente empleados para predecir el comportamiento experimental de los amortiguadores son el plástico no lineal de Bingham, el biviscoso no lineal y el biviscoso histerético no lineal. Los dos primeros son modelos cuasi-estacionarios que no tienen en cuenta la histéresis que experimenta el amortiguador, y el tercero es un modelo dinámico que sí tiene en cuenta este comportamiento. De los dos modelos matemáticos que se exponen, ambos representan tanto el comportamiento biviscoso como el ciclo de histéresis, y son el modelo de Bouc-Wen modificado y el modelo dinámico [7].

4.2 Modelo de Bouc-Wen modificado

Hay muchos modelos matemáticos que desarrollan el comportamiento físico de un amortiguador MR. Spencer et al. presentan un modelo Bouc-Wen básico, con ciertas modificaciones. Su trabajo también incluye un modelo para considerar la relación entre el voltaje de entrada y el fluido magneto-reológico en equilibrio. Yang et al. amplían el modelo presentado por Spencer et al., de tal forma que modelan tanto el circuito magnético como el conductor de corriente. Para reducir el tiempo de respuesta del amortiguador, Yang et al. concluyen que las bobinas electromagnéticas deberían encontrarse dispuestas en paralelo a la línea de acción del amortiguador y el voltaje disponible en el conductor de corriente debería ser tan alto como fuera posible. Además, para reducir la influencia del efecto residual magnético que presentan cuando tienen que reducir la corriente en las bobinas, muestran que la conducción de la corriente en la dirección perpendicular mejora considerablemente el tiempo de respuesta. El esquema del modelo se muestra en la Figura 4.1. En él se identifican las variables espaciales de desplazamiento x , y , z ; la fuerza total del sistema " f " (o F), y las constantes de elasticidad y amortiguamiento k_0 , k_1 , C_0 y C_1 .

Las variables que intervienen en las ecuaciones deducidas de este modelo, son en varios casos dependientes de la corriente (i), es decir, son funciones de la corriente. Estas funciones descritas son aproximadas mediante algoritmos genéticos, con los que se desarrollan unas ecuaciones que describen el comportamiento de las constantes asociadas a los elementos elásticos y amortiguadores (k_0 , k_1 , C_0 y C_1). En el caso de k_0 , por tener una dependencia de la corriente muy irregular, se la considera como una constante y se la da un valor experimental, en este documento se utiliza $k_0=1050$ N/m.

Las ecuaciones que describen las variables k_1 , C_0 y C_1 se obtienen imponiendo al amortiguador unos valores para la corriente de entrada (en este documento son: $i = [0.02 ; 0.06 ; 0.1 ; 0.2 ; 0.4 ; 0.6 ; 0.8 ; 1.05 ; 1.45 ; 1.75]$ A) y un ciclo de automoción determinado (en este documento el ciclo es de 15 Hz de frecuencia y 16 mm de amplitud). Con los resultados obtenidos y, como se ha comentado, mediante

algoritmos genéticos se hace una aproximación de las ecuaciones, de las variables k_1 , C_0 y C_1 , dependientes de la señal.

Las funciones obtenidas por este método son las siguientes:

$$C_0(i) = 26.134i + 5.164 \quad (1)$$

$$C_1(i) = 1150 \tanh(1.95i) \quad (2)$$

$$k(i) = 1297.2 \tanh(1.3i) \quad (3)$$

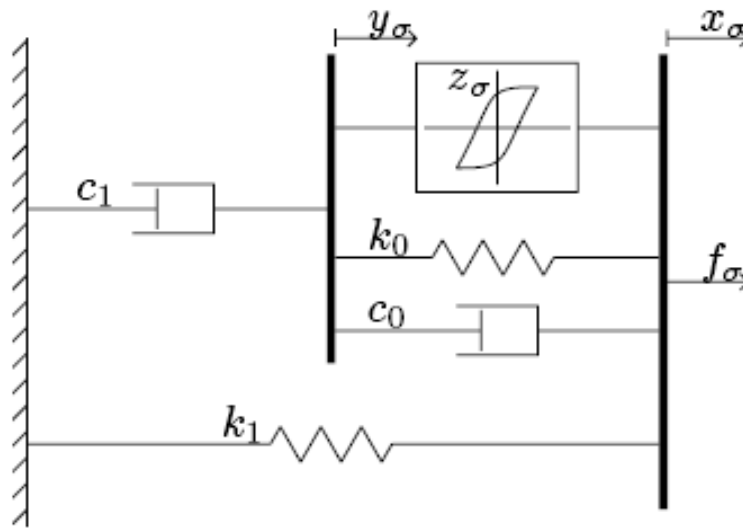


Figura 4.1 Esquema del modelo de Bouc-Wen modificado

Posteriormente analizando el esquema de la Figura 4.1 se obtienen las ecuaciones constitutivas del modelo que permitan finalmente hallar la fuerza resultante del sistema, dependiente de la corriente de entrada. La fuerza de amortiguación (F) generada es:

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (4)$$

donde “ x ” es el desplazamiento total relativo, y “ x_0 ” la desviación inicial de la variable “ x ”, que en este documento tiene un valor nulo. k_1 es una variable de rigidez del sistema.

El desplazamiento parcial relativo “ y ”, y la variable evolutiva “ z ” son gobernadas por las ecuaciones diferenciales:

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [c_0 \dot{x} + k_0(x - y) + kz] \quad (5)$$

donde k es un coeficiente de rigidez asociado al desplazamiento z :

$$\dot{z} = -d |\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} - g(\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + \alpha(\dot{x} - \dot{y}) \quad (6)$$

donde n , d , g , α y k_1 son los “parámetros de lazo”, que controlan la forma y la magnitud de los lazos histeréticos. Por medio de una elección apropiada de estos parámetros, es posible obtener una representación experimental de los lazos histeréticos reales. Los valores elegidos para la simulación en MATLAB se muestran en la Tabla 5.1.

El modelo de Bouc-Wen y el modelo dinámico, por tener una síntesis matemática diferencial, tienen muchas ventajas en el análisis de vibración. La más importante es que pueden ser fácilmente configurados a través de las ecuaciones de cálculo diferencial para dar lugar a un sistema mucho más sencillo.

Por último el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio dinámico del fluido de trabajo está determinado por la Ecuación (7). Siendo “ i ” la corriente suministrada, se alcanzará el equilibrio reológico cuando se modele por un filtro de primer orden, donde la T es un tiempo constante:

$$\frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{T}(i - i_0) \quad (7)$$

Finalmente se obtienen un grupo de ecuaciones que describe el comportamiento físico del amortiguador. En el capítulo 5 se muestra la simulación realizada en MatLab del modelo y los resultados obtenidos [12].

4.3 Modelo dinámico

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, existen gran número de modelos matemáticos que describen el comportamiento físico de un amortiguador MR. No obstante, son pocos los modelos que son capaces de describir no solo el comportamiento biviscoso del fluido de trabajo y en consecuencia la fuerza resultante del sistema, si no también el comportamiento histerético de esta fuerza. Pese a todo, los modelos originales (“*Bouc-Wen model*” y “*bi-viscous hysteretic model*”) tienen una síntesis matemática muy complicada, y en consecuencia no es conveniente utilizarlos para el control y análisis dinámico del amortiguador por el elevado tiempo de respuesta que originan.

El modelo dinámico describe el comportamiento biviscoso del fluido así como el comportamiento histerético de la fuerza resultante con mucha precisión, y además tiene una síntesis

matemática mucho mas sencilla que los modelos comentados. Esto lo hace mucho más adecuado para el estudio y análisis dinámico del amortiguador MR.

El modelo dinámico propone la siguiente ecuación:

$$F = A_1 \tanh\left(A_3\left(\dot{x} + \frac{V_0}{X_0}x\right)\right) + A_2\left(\dot{x} + \frac{V_0}{X_0}x\right) \quad (8)$$

donde F es la fuerza resultante del amortiguador, “x” y su derivada son el desplazamiento y la velocidad del pistón. A₁ es la fuerza proporcionada por el fluido de viscoso, A₂ y A₃ son parámetros relacionados con la viscosidad inicial y final del fluido, y X₀ e Y₀ son los valores críticos del desplazamiento y la velocidad. Por último “x₀” y su derivada son los valores de desplazamiento y velocidad correspondientes a un valor nulo de F.

Con todo lo anterior se puede decir que las siguientes relaciones son correctas:

$$\dot{x}_0 = [V_0 ; -V_0] \quad (9)$$

$$x_0 = [X_0 ; -X_0] \quad (10)$$

y dado que la señal de entrada es sinusoidal:

$$x = a \sin \theta \quad (11)$$

$$\dot{x} = a \omega \cos \theta \quad (12)$$

$$\theta = \omega t + \varphi \quad (13)$$

donde ω es la velocidad angular y por tanto $\omega = 2\pi f$ (siendo f la frecuencia).

Al unir todos los conceptos anteriores se obtiene:

$$X_0 = a \sin \theta_0 \quad (14)$$

$$V_0 = a \omega \cos \theta_0 \quad (15)$$

siendo:

$$0 \leq \theta_0 \leq \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

y obteniendo:

$$\theta_0 = \arctan \frac{V_0}{\omega X_0} \quad (17)$$

por último si se sustituye la Ecuación (17) en la Ecuación (8) se obtiene:

$$F = A_1 \tanh(A_3(\dot{x} + \omega x \tan \theta_0)) + A_2(\dot{x} + \omega x \tan \theta_0) \quad (18)$$

De la Ecuación (18) se obtiene la fuerza resultante del amortiguador, dependiente de la variable de entrada del amortiguador, “x”. Esta ecuación es la que se utiliza para la programación mediante Simulink del “programa general”. Los resultados obtenidos de este programa se muestran en las Figuras 6.5 y 6.6 del capítulo 6.

Los valores de los parámetros A_1 , A_2 y A_3 han sido hallados por el método de mínimos cuadrados. Por otro lado el valor de θ_0 ha sido obtenido de forma experimental. Los valores de A_3 y θ_0 son prácticamente independientes del valor de la corriente de entrada (“i”), y se encuentran dependientes de la amplitud y la frecuencia de la excitación [11].

Los valores elegidos para la simulación, así como la propia simulación en MATLAB, se encuentran recogidos dentro del capítulo 5, en el punto 5.3.

CAPÍTULO 5

SIMULACIÓN EN MATLAB

5.1 Introducción: MATLAB

MATLAB fue creado por The MathWorks en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje. El lenguaje de programación M fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices LINPACK y EISPACK, sin tener que usar Fortran. En 2004, se estimaba que MATLAB era empleado por más de un millón de personas en ámbitos académicos y empresariales. MATLAB ha evolucionado y crecido con las aportaciones de muchos usuarios. En entornos universitarios se ha convertido junto con Matemática y Maple, en una herramienta instructora básica para cursos de matemática aplicada así como para cursos avanzados en otras áreas. En entornos industriales se utiliza para investigar y resolver problemas prácticos y cálculos de ingeniería. Son aplicaciones típicas el cálculo numérico, la resolución de problemas con formulación matricial, la estadística, la optimización, etc. Es de destacar la aplicación en el estudio, simulación y diseño de los sistemas dinámicos y de control.

MATLAB (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X (las especificaciones técnicas se encuentran en el apartado de Anexo/Especificaciones) y entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

Por otro lado, el paquete MATLAB, dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, que son Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las *cajas de herramientas* (*toolboxes*); y las de Simulink con los *paquetes de bloques* (*blocksets*) [9].

5.1.1 Herramienta Simulink

Simulink es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Es de un nivel mas alto de abstracción que el lenguaje interpretado MATLAB (archivos con extensión .m), y genera archivos con extensión .mdl (de "model").

En la Figura 5.1 se puede apreciar el diagrama en bloques de un Radar, en el que se muestra que uno de sus bloques de procesamiento de señal es un filtro Kalman realizado en un script de MATLAB.

Simulink viene a ser una herramienta de simulación de modelos o sistemas, con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos. Se hace hincapié en el análisis de sucesos a través de la concepción de sistemas (cajas negras que realizan alguna operación).

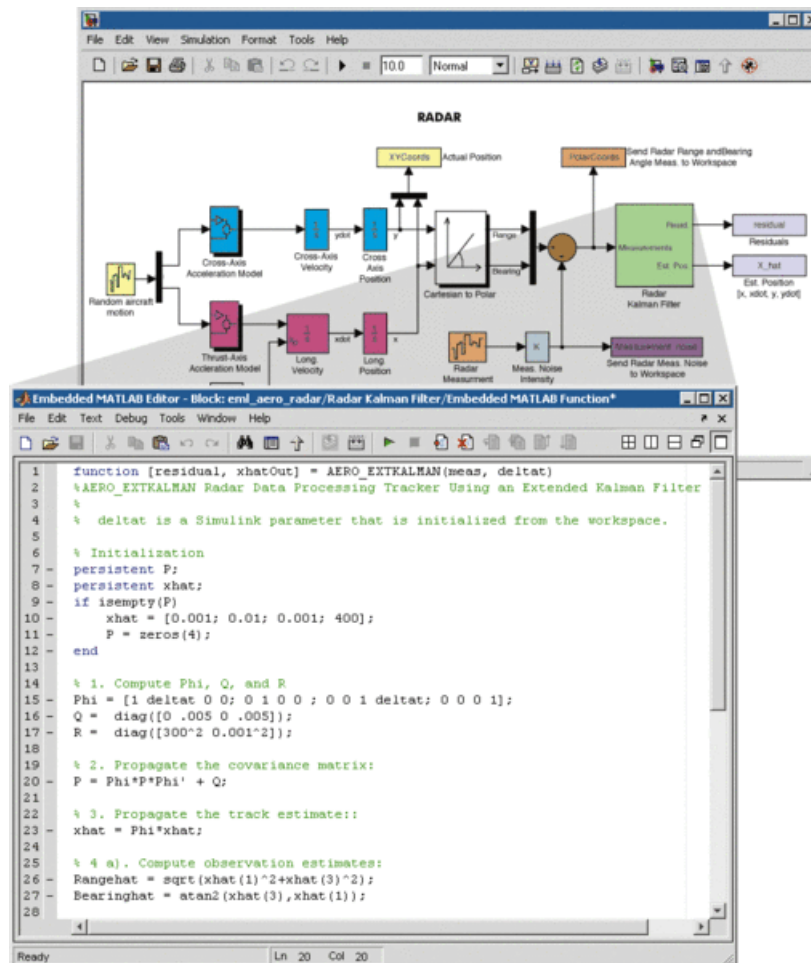


Figure 5.1 Ejemplo de trabajo en Simulink

Es muy utilizado en Ingeniería Electrónica en temas relacionados con el procesamiento digital de señales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica, telecomunicaciones, entre otros. También es muy utilizado en Ingeniería de Control y Robótica [9].

5.2 Simulación del modelo de Bouc-Wen modificado

En este apartado se trata de obtener la simulación de las ecuaciones proporcionadas por el modelo de Bouc-Wen. La modelización se ha realizado mediante la herramienta, incluida en el paquete MATLAB, Simulink. Con esta herramienta se construyen los bloques de ecuaciones expuestas en el apartado 4.2, del capítulo 4.

Para poder definir más eficazmente los bloques, se han coloreado las variables de entrada en verde y las de salida en rojo. Por otro lado las constantes están en color azul.

5.2.1 Programación de los bloques

La modelización de los bloques requiere comenzar identificando en las ecuaciones las variables de entrada y salida, y las constantes que intervienen en las ecuaciones.

Se empieza por modelizar los coeficientes dependientes de la corriente, los cuales han sido obtenidos por optimización mediante algoritmos genéticos, proceso no incluido en este documento. Estos coeficientes se exponen en las siguientes ecuaciones (Ecuación (19), (20) y (21)):

$$C_0(i) = 26.134i + 5.164 \quad (19)$$

$$C_1(i) = 1150 \tanh(1.95i) \quad (20)$$

$$k_1(i) = 1297.2 \tanh(1.3i) \quad (21)$$

se observa que todos ellos son dependientes de la corriente. Se puede decir entonces que tenemos como variable de entrada, la corriente y como variables de salida k_1 , C_0 y C_1 . Como constantes, en este caso, no se tiene ninguna, ya que al haber sido obtenidos los coeficientes mediante algoritmos genéticos, se ha hecho una aproximación de todos los factores de las ecuaciones.

El modelo programado de cada uno de los coeficientes se expone en las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4.

- Bloque "Corriente 1" (C_0):

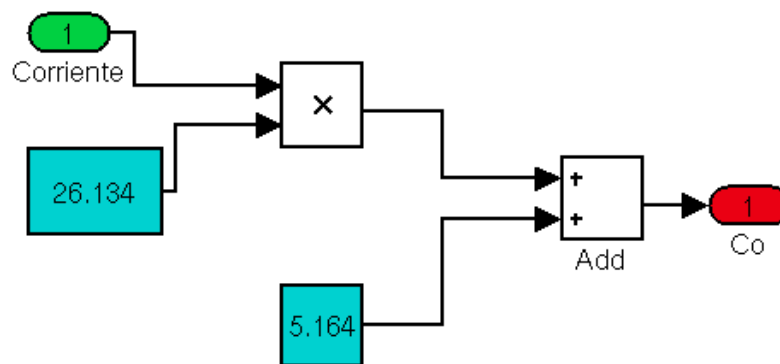


Figura 5.2 Programa "Corriente 1"

Este programa corresponde a la Ecuación (19). Es una función lineal de orden uno para la que se toman todos sus factores como constantes, coloreados en azul. La corriente, coloreada en verde, es la entrada del subsistema, que posteriormete se acoplará en otro programa mayor. En todos los programas de las Ecuaciones (19), (20) y (21) se tiene como entrada la corriente, de forma que, al acoplarlos todos en otro subsistema mayor, sea posible dar un valor de entrada a la corriente y que este valor se traduzca a las entradas de los subsistemas de las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4.

- Bloque "Corriente 2" (K_1):

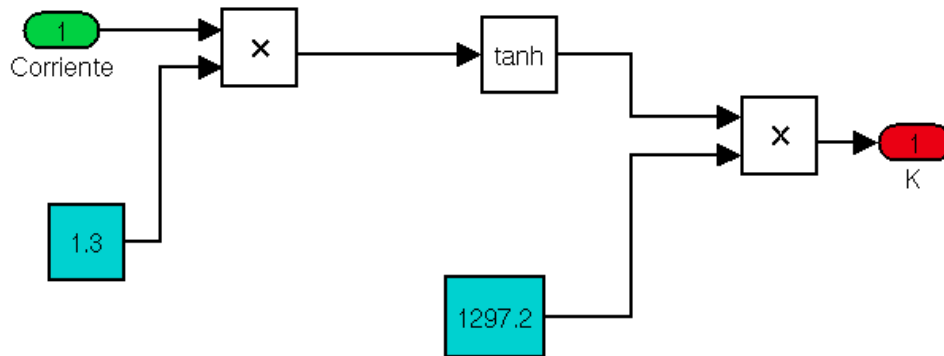


Figura 5.3 Programa "Corriente 2"

- Bloque "Corriente 3" (C_1):

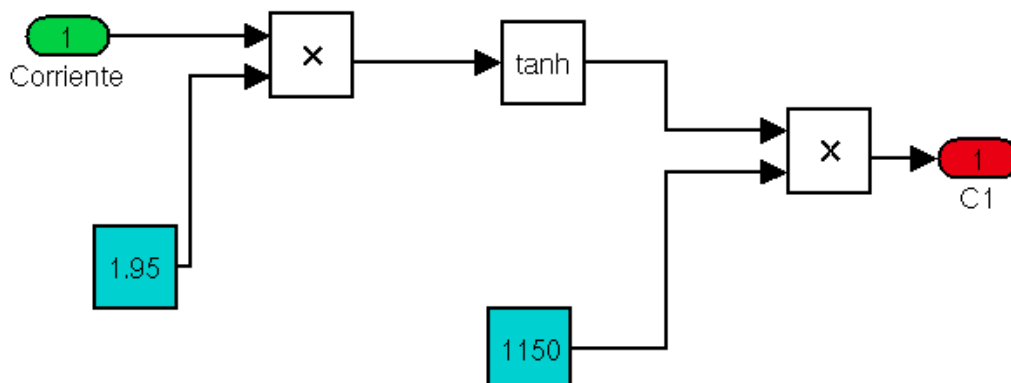


Figura 5.4 Programa "Corriente 3"

Las constantes que se ven coloreadas en azul, son los factores que aparecen en las ecuaciones. La herramienta Simulink permite cambiar el valor de las constantes en cualquier momento, ajustando la ecuación para otros valores.

Cada uno de estos bloques suponen una función de las anteriores descritas, y se montan a continuación en un conjunto o bloque (Fig. 5.5), llamado bloque "Corrientes". Se observa como la variable de entrada está coloreada de verde, y las de salida de rojo. Los nodos con forma triangular y con un coeficiente de valor 100, son las ganancias, operadas como multiplicadores, predefinidas en el modelo; estos valores no están conceptuados como constantes, ya que son aplicados con la intención de

obtener unos resultados de salida más resolutivos, o dicho de otra manera, se escriben con el objetivo de obtener una mayor resolución de los resultados obtenidos.

El bloque donde se integran los anteriores se muestra en la Figura 5.5.

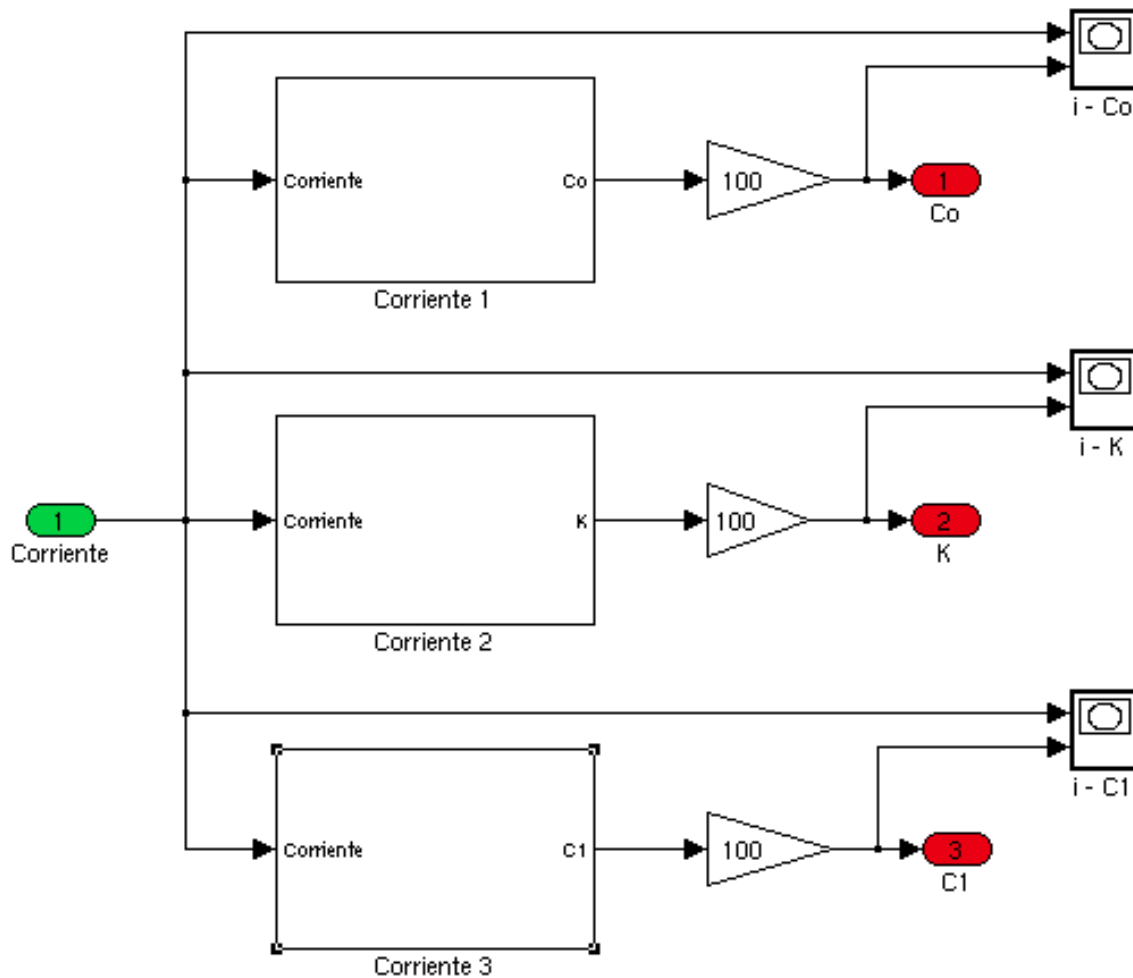


Figura 5.5 Programa "Corrientes"

Los nodos que se encuentran totalmente a la izquierda y que llevan el nombre de $i - C_0$, $i - K_1$ e $i - C_1$, son gráficos XY, que permiten obtener los resultados del modelo y muestran, por ejemplo, el primero de ellos un gráfico de abscisas, la corriente y de ordenadas, el coeficiente C_0 . Para el modelo general, la entrada de la corriente es un valor constante y por tanto las gráficas, de las que acabamos de hablar, únicamente mostrarán un valor puntual.

El siguiente programa que se escribe es la velocidad derivada del desplazamiento z . Esta variable evolutiva " z ", tiene influencia en el desplazamiento " y ", que, como se ha visto, tiene a su vez influencia en la variable de salida global " F " (fuerza del amortiguador). La ecuación de esta variable es la siguiente (tomada del apartado 4.2, del capítulo 4):

$$\dot{z} = -d|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - g(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + \alpha(\dot{x} - \dot{y}) \quad (22)$$

La programación de esta variable se obtiene tras la localización de las variables de entrada y salida. Se tiene como variable de salida el desplazamiento “z”, primitiva de la velocidad aportada por la ecuación; como variables de entrada el desplazamiento “x”, el cuál es una variable que gobierna el modelo general y debe de ser introducida por el programador, y el desplazamiento “y”, que junto con su derivada forma parte de la ecuación. Es aquí donde se establece el primer ciclo, es decir, la variable “y” forma parte de la ecuación de “z”, así como la segunda forma parte de la ecuación de la primera. Este ciclo puede observarse en el “Subsistema global”.

Se observa además como la variable “z” se reintroduce en la propia ecuación desde la salida, escribiéndose otro ciclo dentro del propio bloque.

El programa que corresponde a la Ecuación (22) se expone en la Figura 5.6.

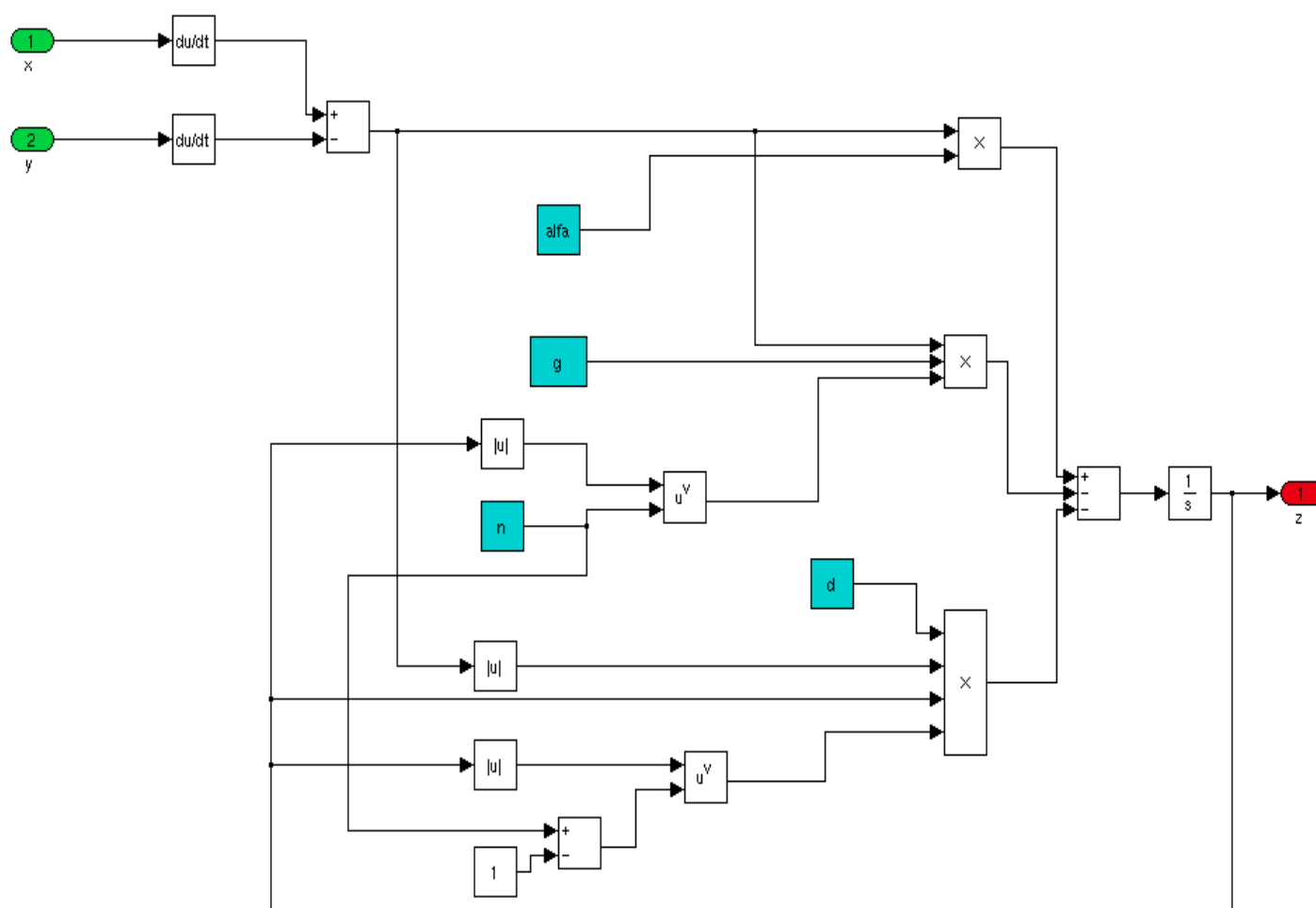


Figura 5.6 Programa "Velocidad 2"

El siguiente modelo programado es la velocidad derivada del desplazamiento “y”, llamado bloque “Velocidad 1” y que tiene como ecuación fundamental la siguiente (obtenida del apartado 4.2, del capítulo 4):

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [c_0 \dot{x} + k_0(x - y) + k_z z] \quad (23)$$

La variable de salida de este bloque se identifica, en el esquema de Figura 4.1, como el desplazamiento relativo “y”, así como las variables de entrada son C_0 , C_1 , k , “x”, “z” e “y”. La variable de salida corresponde con el desplazamiento intermedio expuesto en la Figura 4.1, y es una variable dependiente, es decir no esta impuesta por el programador, si no que se obtiene a partir de las que si son impuestas. Por otro lado se observa aquí otro ciclo como en el caso del bloque anterior, en el cuál, se opera la variable desplazamiento “y”, para obtener su velocidad derivada.

El programa se expone en la Figura 5.7.

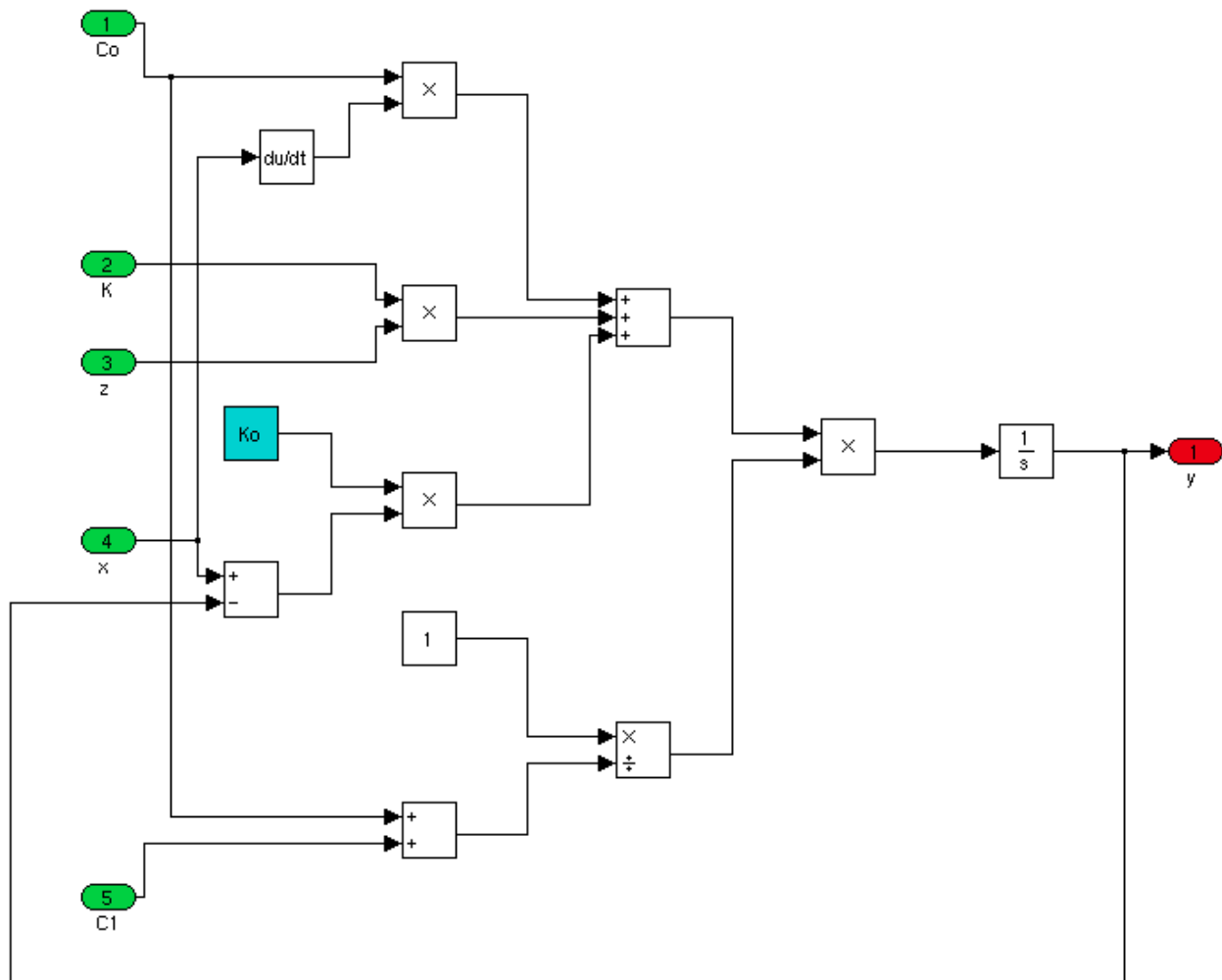


Figura 5.7 Programa "Velocidad 1"

Se puede observar en el programa un operador integral antes de la salida, al igual que el módulo anterior; este operador se ha instalado para poder utilizar la variable de salida como desplazamiento, ya que esta requerida como tal en otros módulo o incluso en el el propio donde se obtiene. La herramienta Simulink trabaja comenzando el desarrollo matemático por estos operadores integrales por lo que es necesario inicializarlos.

Por último se encuentra el bloque de salida o bloque “Fuerza 1”, que corresponde con la salida global de la fuerza del amortiguador. La ecuación que define este bloque es la siguiente (obtenida en el apartado 4.2, del capítulo 4):

$$F = c_1 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (24)$$

Esta ecuación diferencial tiene como variable de salida la fuerza ejercida por el amortiguador “F”. Esta fuerza esta expresada como un valor escalar, no obstante, su vector director estaría dirigido en la dirección del desplazamiento “x” (Fig. 4.1), y con sentido positivo en el eje de abcisas.

Las variables de entrada de la ecuación son C_1 , “y”, “x” y “ x_0 ”. La última de estas variables es un valor introducido por el programador, que puede considerarse como una constante, pero que realmente es una variable, ya que está referida al punto inicial sobre el que comienza el desplazamiento en las abcisas, es decir, es un valor inicial en el que se encontraría el bástago del amortiguador si tuviera una compresión o extensión y quisieramos hacer una evaluación global del problema, contando como $x_0 = 1$, cuando el amortiguador estuviera pretensado hasta un desplazamiento de valor unidad.

El bloque “Fuerza1” se expone a continuación (Fig. 5.8):

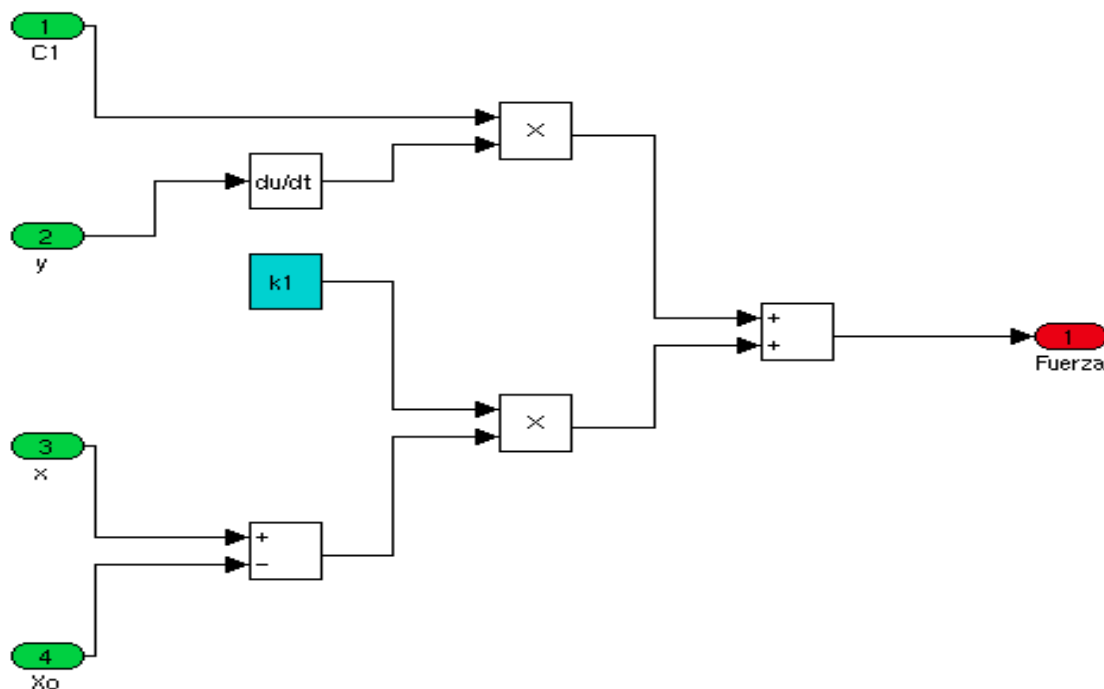


Figura 5.8 Programa "Fuerza1"

Este es el último de los bloques programados que deberán incluirse en el conjunto que se trata a continuación.

5.2.2 Programación del conjunto

Con todos los bloques individuales programados, se deben establecer las relaciones entre ellos que permiten realizar las operaciones necesarias y así obtener una salida llamada “Fuerza”, a partir de dos entradas, el desplazamiento “x” y el valor de la corriente “i”. El valor de esta corriente es el que se le suministra al electro imán, con el cuál se conseguirá aplicar un campo magnético, de intensidad variable, al fluido reológico. Es por tanto evidente, dado que ya se conoce el funcionamiento de un amortiguador magneto-reológico, la relación entre las entradas y las salidas propuestas, ahora solo queda escribirlas mediante Simulink, y obtener los datos relativos al planteamiento escogido (modelo de Wouc-Wen).

Las entradas serán la corriente, que se tiene como entrada de los bloques “Corriente 1”, “Corriente 2” y “Corriente 3”, y el desplazamiento relativo “x”. Este desplazamiento es una función dependiente del tiempo expuesta en la Ecuación (25):

$$x(t) = A \operatorname{sen}(2\pi f t) \quad (25)$$

donde “f” es la frecuencia de oscilación y “A” la amplitud del movimiento. Los valores de “t” irán descritos por un nodo “reloj”, el cuál toma valores con un paso a elegir, de forma periódica. El programa correspondiente a esta ecuación se muestra en la Figura 5.9.

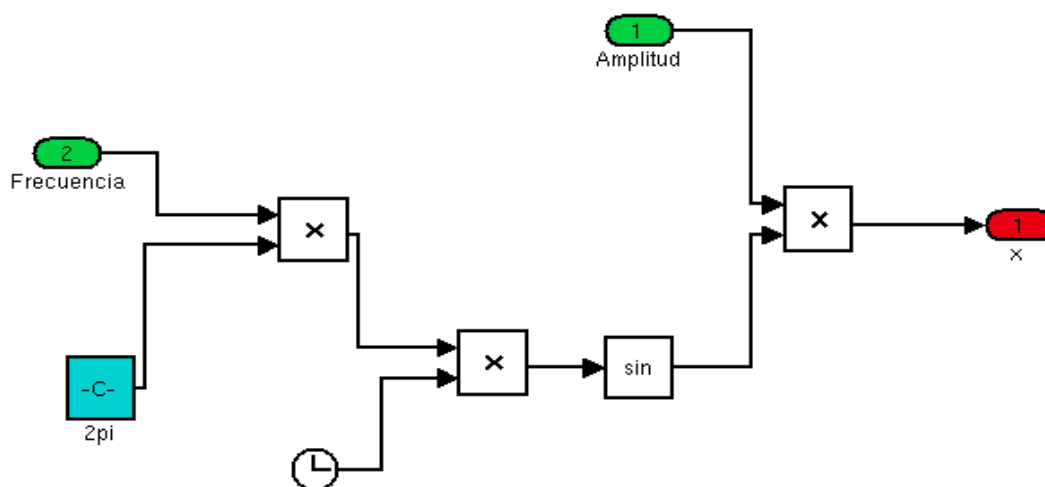


Figure 5.9 Programa "Desplazamiento"

Este subsistema “Desplazamiento” está integrado en un conjunto general que permite un mejor manejo del programa. Como se ha explicado para los programas “Corrientes1”, “Corrientes2” y “Corrientes3”, las variables de entrada, coloreadas en verde, son introducidas en un programa o conjunto general con la intención de conseguir un bloque en el que poder introducir todas las variables directamente, y, que de este bloque, se traduzcan los valores a los subsistemas acoplados en su interior.

El programa subsistema global se expone en la Figura 5.10.

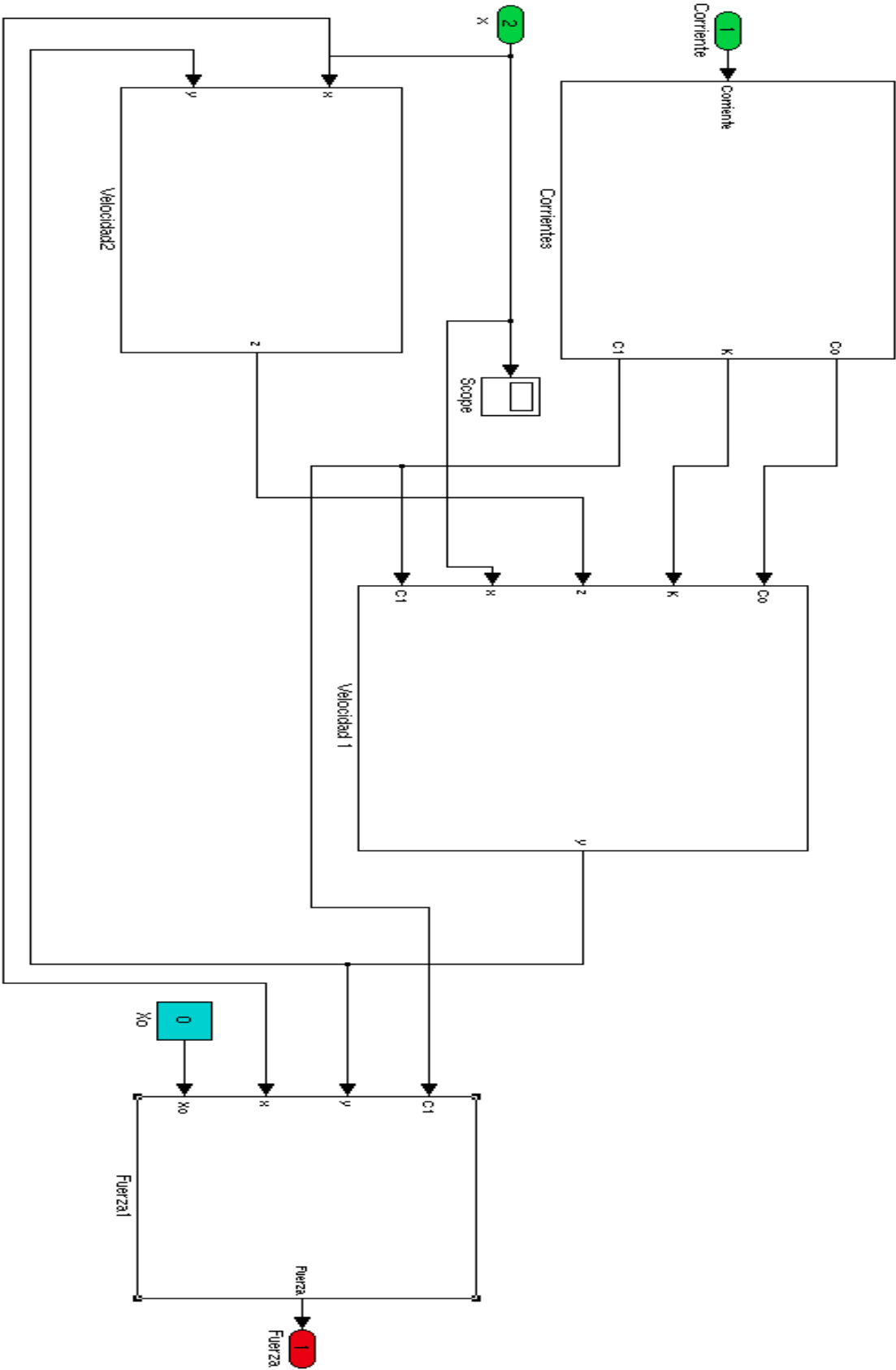


Figure 5.10 Programa "Subsistema global"

Dentro del programa “Sistema global” existe un nodo llamado “Scope” que se utiliza para graficar la señal de entrada, “desplazamiento” dependiente del tiempo, y de esta manera, poder comprobar que el comportamiento de esta entrada es sinusoidal. El “Sistema global” integra los bloques de “Corrientes”, “Velocidad1”, “Velocidad2” y “Fuerza1”

Por último se escribe un sistema general en que se incluye el anterior, en forma de módulo independiente, la entrada “x” (programa “Desplazamiento”) y los gráficos de las señales de salida. Este sistema se realiza con el objetivo de aislar las entradas y las salidas generales, y así, poder cambiar las variables con la mayor facilidad posible. Este sistema se muestra en la Figura 5.11.

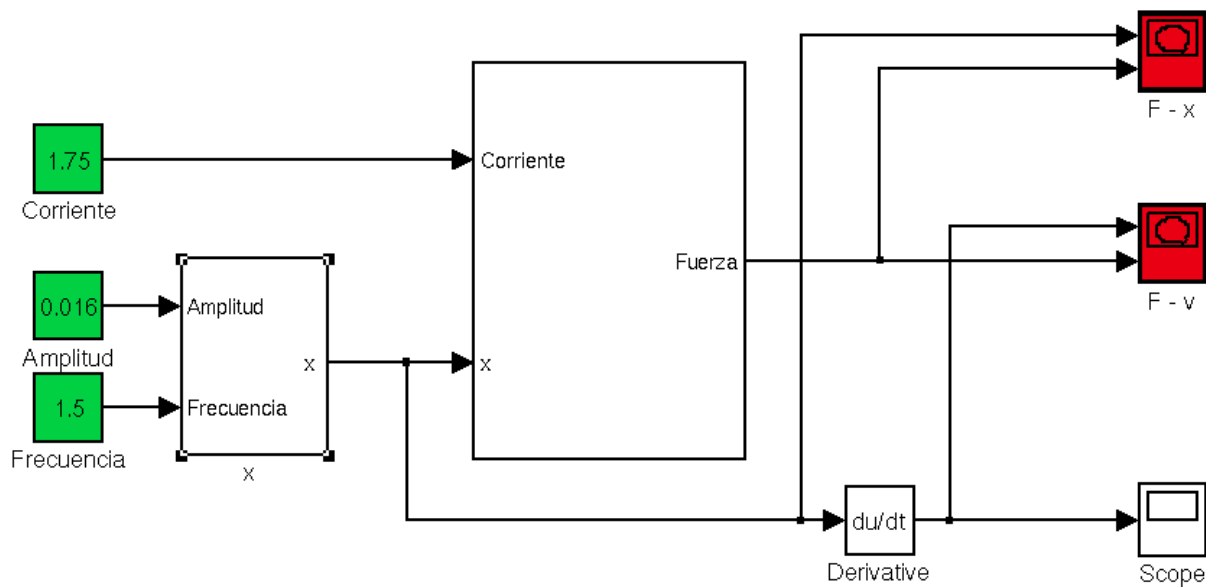


Figura 5.11 Programa "General"

En la Figura 5.11 se observan dos nodos de “Grafico XY”, utilizados para graficar los conjuntos fuerza-desplazamiento y fuerza-velocidad. Las gráficas de las salidas de los programas se exponen en el capítulo 6.

Solo queda añadir el sentido que tiene la programación en módulos, la cuál permite establecer relaciones entre las variables de forma fácil y sencilla y orientar el programa hacia los requisitos que se pidan por parte del programador, ya que permite un cambio de las variables fácil y rápido.

En el siguiente apartado se definen los valores de los parámetros introducidos en el programa y que dan lugar a unas salidas. No obstante, los valores que se han introducido como variables de entrada se exponen en el capítulo 6, en el que se analizan los resultados. Los valores que se han tomado, tanto para las constantes como para las variables, son escogidos de acuerdo a un problema concreto con unas características concretas y pueden ser cambiados suponiendo un amortiguador de características diferentes u otra excitación (variable de entrada).

5.2.3 Definición de los parámetros

Anteriormente se ha desarrollado el significado físico de las variables de entrada y salida pero no el de las constantes programadas y el resto de variables. Los valores característicos del amortiguador, y que pueden ser variados gracias a los fluidos reológicos que se introducen como fluido de trabajo, son los coeficientes de amortiguamiento (C_0 y C_1), y una constante de rigidez relacionada con la formación de las estructuras columnares de las partículas magnéticas en flotación tras haber aplicado el campo magnético; esta constante de rigidez, que es dependiente también de la corriente introducida, es “k”.

Los valores n , d , g y α , son valores característicos del amortiguador tomados como base para obtener, mediante algoritmos genéticos, los factores de los que hablábamos en el párrafo anterior. Por último los desplazamientos relativos, expuestos en el esquema planteado en la Figura 4.2, son “x” e “y”.

En la Tabla 5.1 se exponen los valores tomados para todos estos coeficientes, estos valores han sido escogidos de acuerdo al problema planteado y se representan como constantes dentro de los programas. Su valor es fijo y no debe ser cambiado.

Tabla 5.1 Valores de los parámetros del modelo de Bouc-Wen

n	2
$d \text{ (m}^{-1}\text{)}$	500
$g \text{ (m}^{-2}\text{)}$	613000
α	30.56
$K \text{ (N/m)}$	540
$K_0 \text{ (N/m)}$	1050

Como ya se ha explicado el último valor de la tabla, K_0 , no es un valor constante, pero como resulta ser excesivamente irregular se toma como una constante.

5.3 Simulación del modelo dinámico

Como en el caso anterior en este punto se exponen los bloques de simulación del segundo modelo ("modelo dinámico"). Primero se muestra el subsistema de la variable de entrada "x", y posteriormente el subsistema global correspondiente a la Ecuación (18). Por último, como en el caso anterior, se muestra un sistema global que agiliza la tarea del programador a la hora de hacer cambios dentro del modelo e imponer variables de entrada. Igualmente, como en el caso anterior, los colores que se muestran en los programas están referidos a las entradas (verde), salidas (rojo) y a los valores tomados como constantes (azul).

5.3.1 Programación de los bloques

Como ya se ha comentado, lo primero que se programa dentro del programa completo es la variable de entrada del amortiguador ("x"). Este programa se escribe a partir de la Ecuación (26):

$$x(t) = A \operatorname{sen}(2\pi f t) \quad (26)$$

los valores de las variables que intervienen en la ecuación se exponen en el siguiente punto.

El programa se expone en la Figura 5.12.

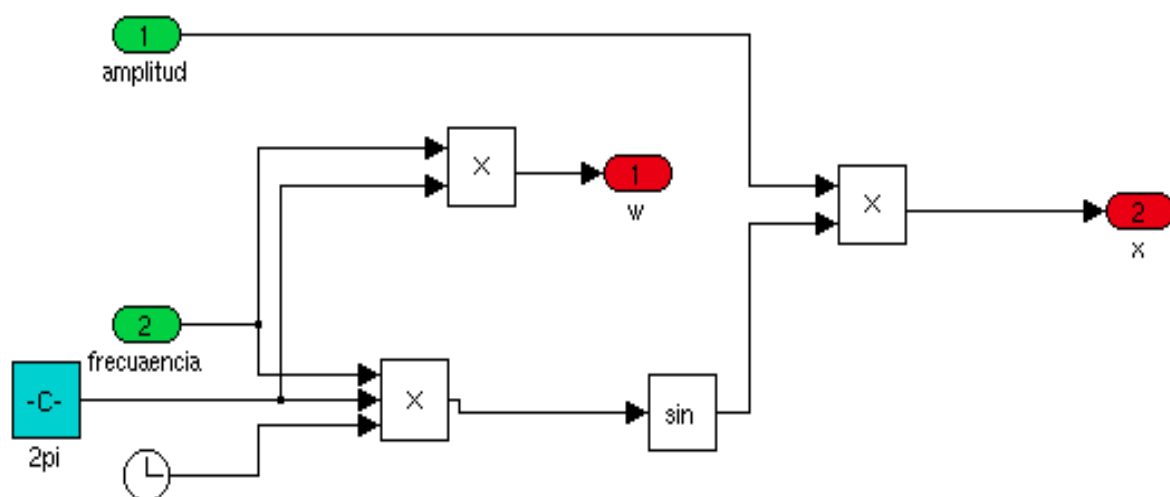


Figura 5.12 Programa Signal

Las entradas coloreadas en verde corresponden a la amplitud y la frecuencia de la señal sinusoidal de entrada, las cuales serán impuestas por el programador con la intención de obtener los valores correspondientes a un ensayo real. Las salidas son “x” y “ω”, el valor de la perturbación sobre el amortiguador y su velocidad angular. Ambos valores son utilizados en el siguiente subprograma y es por ello que se utilizan aquí como salidas del sistema. Por último esta el valor constante de 2π , coloreado en azul.

Se observa que el valor del tiempo se introduce como una señal de reloj. Esta función de Simulink introduce valores dentro de un rango acotado por el programador, y con un paso constante, elegido también por el programador.

El siguiente subsistema es la ecuación general del modelo (Ecuación (18)). En este caso al tener un modelo matemático mucho más sencillo, el programa resultará más pequeño y fácil de utilizar; no obstante, como ya se ha comentado, los valores de las variables que intervienen en el modelo precisan de un estudio mediante mínimos cuadrados para ser obtenidos, y este proceso no se incluye en el documento. Este subsistema corresponde a la Ecuación (27):

$$F = A_1 \tanh(A_3(\dot{x} + \omega x \tan \theta_0)) + A_2(\dot{x} + \omega x \tan \theta_0) \quad (27)$$

y la programación de la Ecuación (27) se muestra en la Figura 5.13.

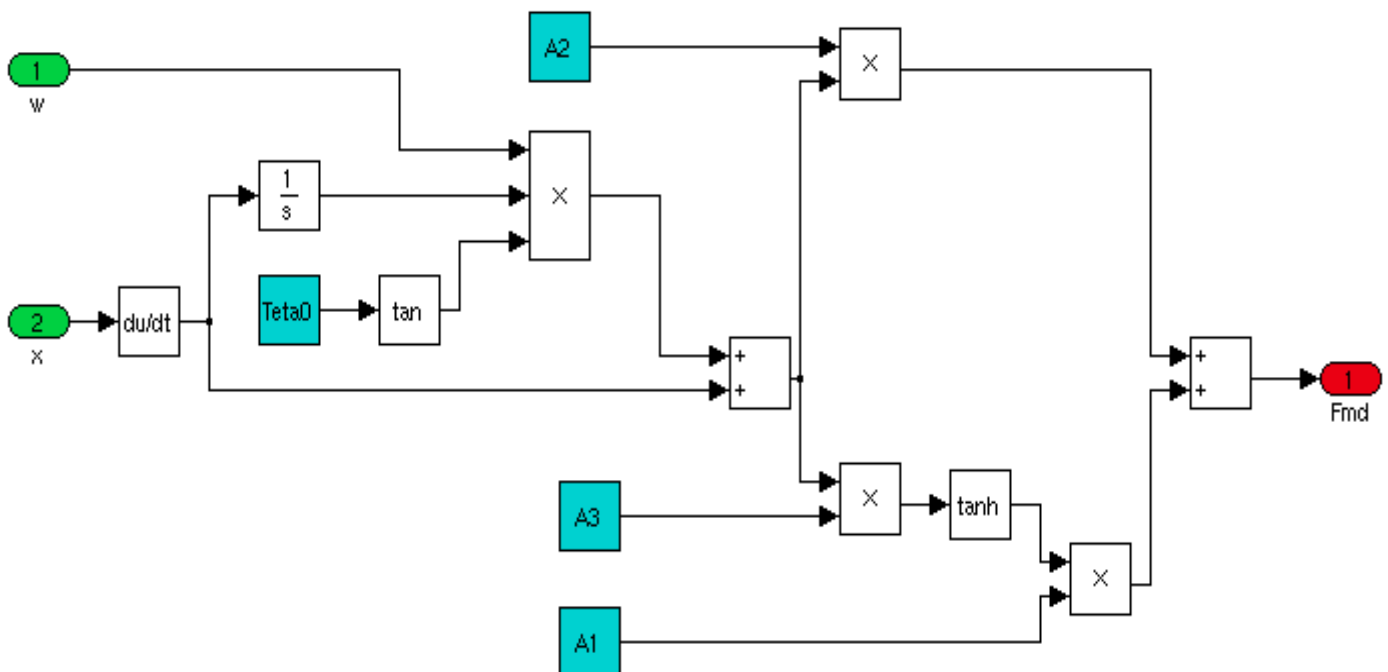


Figura 5.13 Subsistema Programa

Dentro el subsistema “Programa”, se identifican las entradas “x” y “ω”, que son salidas del subsistema “Signal”, la salida “F_{md}”, que corresponde a “F” dentro de la Ecuación (27), y las constantes

“ A_1 ”, “ A_2 ”, “ A_3 ” y “ θ_0 ”. Además, como ya se explico en el modelo anterior, se muestra un integrador (reconocido por “ $1/s$ ”), que se emplea para inicializar el programa. El valor de inicio del integrador ha sido en todo caso 0.

Tras la programación de los bloques se realiza ahora la programación del conjunto global del modelo.

5.3.2 Programación del conjunto

El conjunto global del modelo dinámico integra los subsistemas “Signal”, que consiste en la señal de entrada al amortiguador, o lo que es lo mismo el movimiento que se induce al bástago del amortiguador, y el subsistema “Programa”.

El programa completo del modelo se expone en la Figura 5.14.

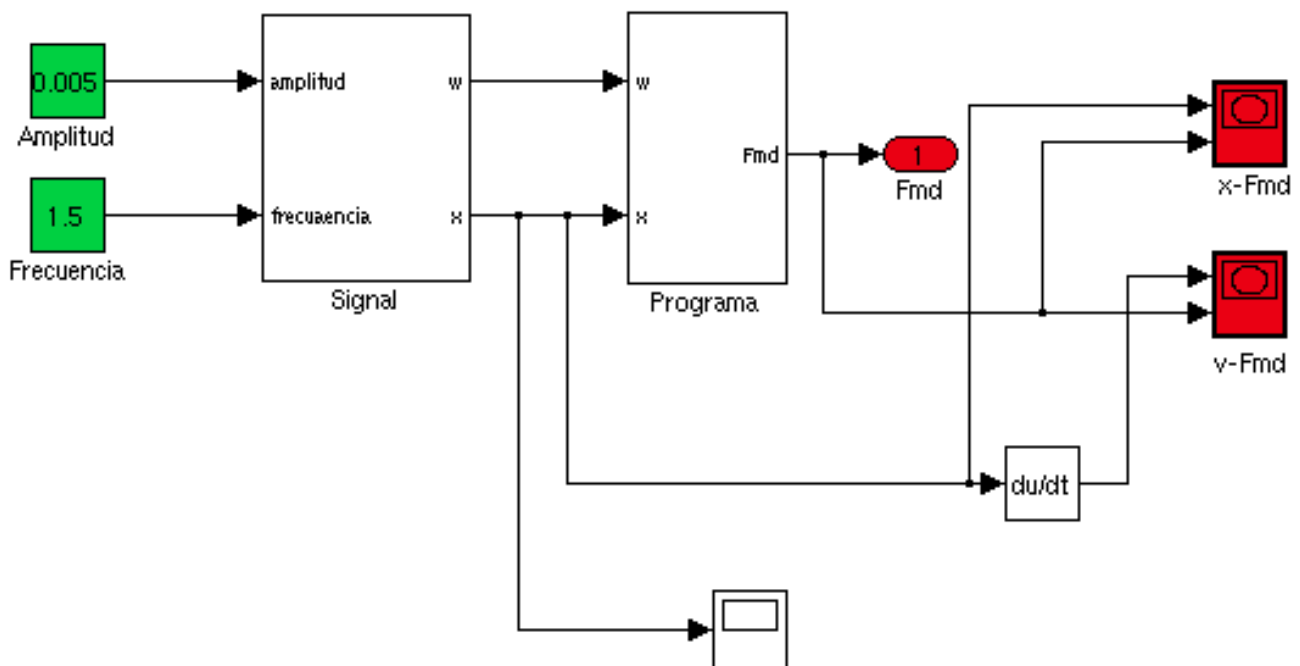


Figura 5.14 Programa Completo, conjunto global

Los nodos en rojo, que se encuentran a la derecha de la Figura 5.14, representan dos “Gráficos XY”, correspondientes, el primero de ellos al Desplzamiento-Fuerza, y el segundo de ellos a Velocidad-Fuerza. Además en la parte inferior de la figura se encuentra un nodo “Scope” que permite graficar la señal de entrada.

Para terminar en el siguiente punto se describen los valores de las variables que intervienen en el modelo, las cuáles en cualquier caso han sido escogidas por ser las mismas utilizadas en el ensayo real que no se documenta en este proyecto.

5.3.3 Definición de los parámetros

En este capítulo se han explicado dos modelos matemáticos del comportamiento físico de un amortiguador MR, es por esto que las variables de entrada y salida de ambos modelos son prácticamente las mismas, no obstante en el modelo dinámico el valor de la corriente de entrada del electroimán montado en el amortiguador no se tiene como una variable, ya que define el valor de las constantes A_3 y A_2 . Estos dos parámetros, pese a que realmente no son valores propiamente constantes, ya que dependen del campo magnético aplicado, se toman como tales para este estudio y sus valores hallados se muestran, junto con los valores de A_1 y θ_0 , en la Tabla 2.

Tabla 5.2 Valores de los parámetros del modelo dinámico

$A_1(\text{N})$	900
$A_2(\text{Ns/m})$	40000
$A_3(\text{s/m})$	140
θ_0	0,14

Finalmente los resultados de la simulación se muestran en el capítulo 6, donde se exponen los Gráficos XY que se han identificado dentro de los programas globales de ambos modelos.

CAPITULO 6

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

6.1 Modelo de Bouc-Wen

En este capítulo se introducen las variables de los modelos matemáticos y se exponen los resultados de la simulación. El primero de los modelos es el de Bouc-Wen, para el cuál se han elegido unas variables de acuerdo a un ensayo real. Es evidente que el valor de estas variables puede ser cambiado para asemejar la simulación a otro ensayo de las mismas características.

6.1.1 Introducción de las variables

Como ya se ha explicado el concepto de variable, por si mismo, ya indica que no se trata de valores constantes, pero con el fin de poder comparar los resultados con los del ensayo se han elegido los valores expuestos en la Tabla 3.

Tabla 6.1 Valores de las variables de entrada del modelo de Bouc-Wen

i (A)	1.75
A (m)	0.016
f (Hz)	1.5
X_0 (m)	0

La variable corriente “ i ” es un valor puntual desde el que se obtienen C_0 , C_1 y K , dando lugar a una función de la fuerza dependiente, en último caso, del tiempo. Esta corriente, como ya se ha deducido, es un valor que realmente cambia constantemente, alterando la salida del programa y permitiendo finalmente la adaptación del amortiguador a las solicitudes.

También se han elegido unos valores para las variables de amplitud y frecuencia, así como para el desplazamiento inicial del bástago respecto de una posición de valor nulo para la fuerza resultante. Como en el caso de la corriente estos valores cambiarían constantemente en un estado real, lo que significa que el estudio de un caso puntual se realiza unicamente para validar el modelo. Además de estas variables existe otra, el tiempo, que tomará valores desde 0 hasta 2 s.

Finalmente se exponen a continuación los resultados de la simulación.

6.1.2 Interpretación de los resultados

Como se ha comentado en el capítulo 5 dentro de los programas se incluyen nodos “Scope” para graficar las entradas del sistema, estos nodos representan la variable “x” y la corriente, no obstante la gráfica de la corriente, por ser un valor puntual, consiste unicamente en un punto y no se incluye dentro del documento.

La gráfica de la variable “x” se muestra en la Figura 6.1.

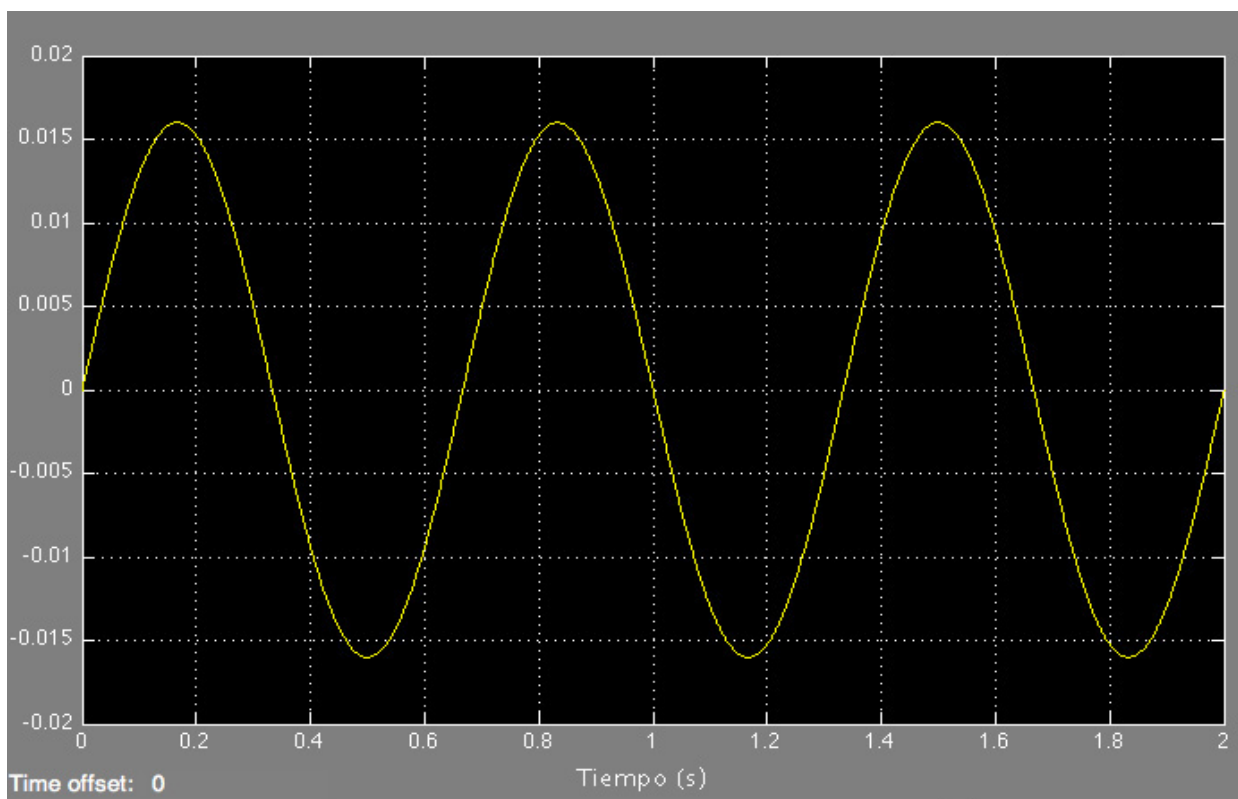


Figura 6.1 Señal de entrada "x"

Se observa en la gráfica el comportamiento sinusoidal de la variable dependiente del tiempo, su amplitud máxima y su periodo.

Las Grafica XY representan, como ya se ha comentado, la relación del desplazamiento y la velocidad con la fuerza. El primero de los gráficos corresponde al desplazamiento en relación con la fuerza resultante del sistema y se expone en la Figura 6.2.

Se observan dentro de la gráfica los valores máximos del desplazamiento del bástago del amortiguador, así como la fuerza ejercida en cada caso. La línea que surge desde el centro hasta el ciclo no se valora como resultado ya que es consecuencia del cálculo, que comienza con un valor nulo y lo conecta con el siguiente resultado.

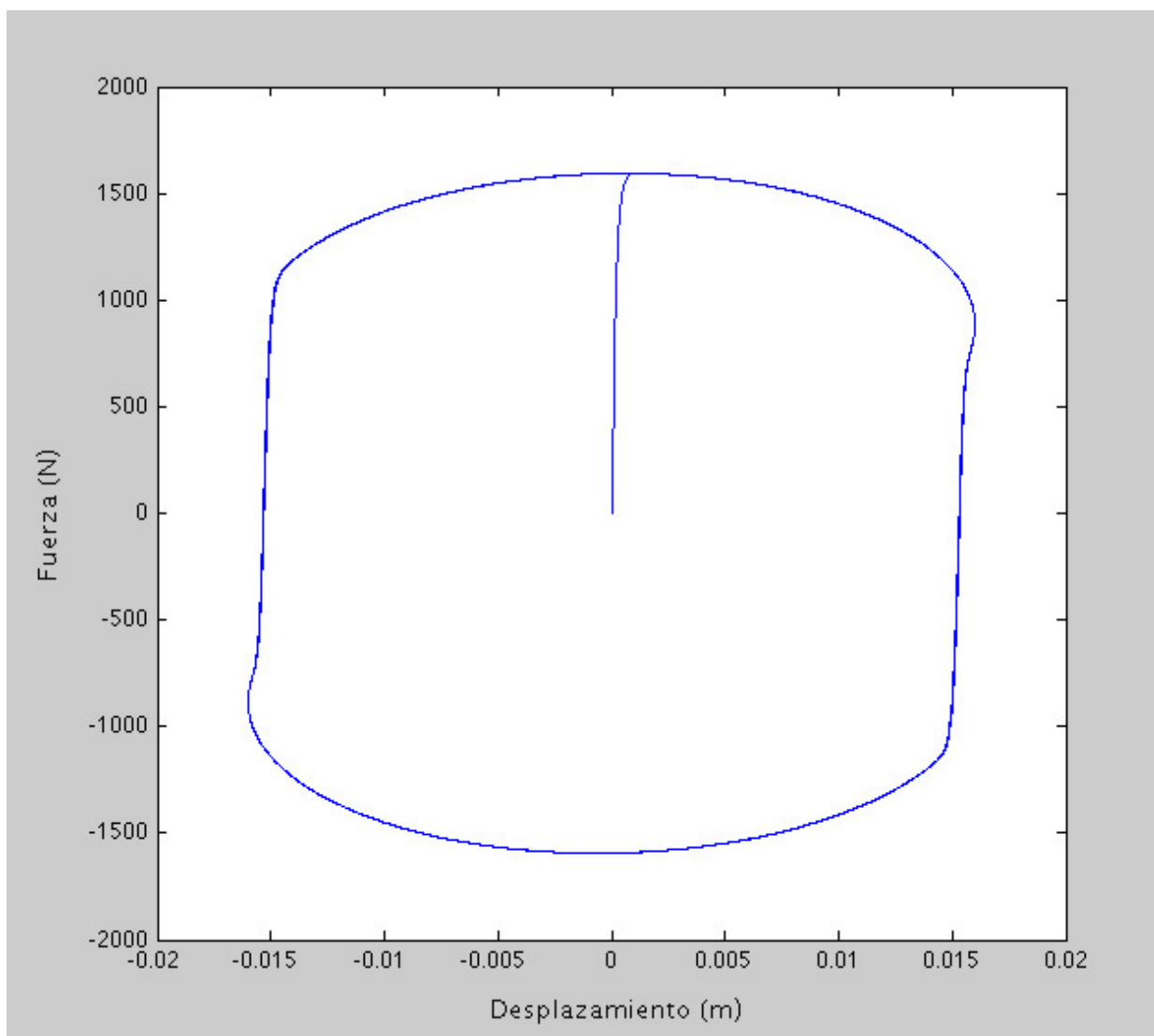


Figura 6.2 Gráfica Desplazamiento (m) – Fuerza (N)

La gráfica presenta una apariencia simétrica, es decir, los valores absolutos en la carrera de compresión y expansión son los mismos, lo que supone un doble comportamiento viscoso del amortiguador, tanto en la carrera de compresión, donde la viscosidad del fluido de trabajo opone una fuerza al fluir del mismo, como en la carrera de expansión, donde al ser absorbido dentro de la cámara principal del amortiguador, la viscosidad del fluido vuelve a provocar una oposición a fluir por las válvulas que conectan las dos cámaras. En los desplazamientos críticos se observa un menor radio de curvatura provocado por los efectos de inercia.

La siguiente gráfica (expuesta en la Figura 6.3) representa la relación de la velocidad del bástago con la fuerza del amortiguador. En ella se observan los valores críticos de la velocidad y la fuerza correspondiente en cada caso.

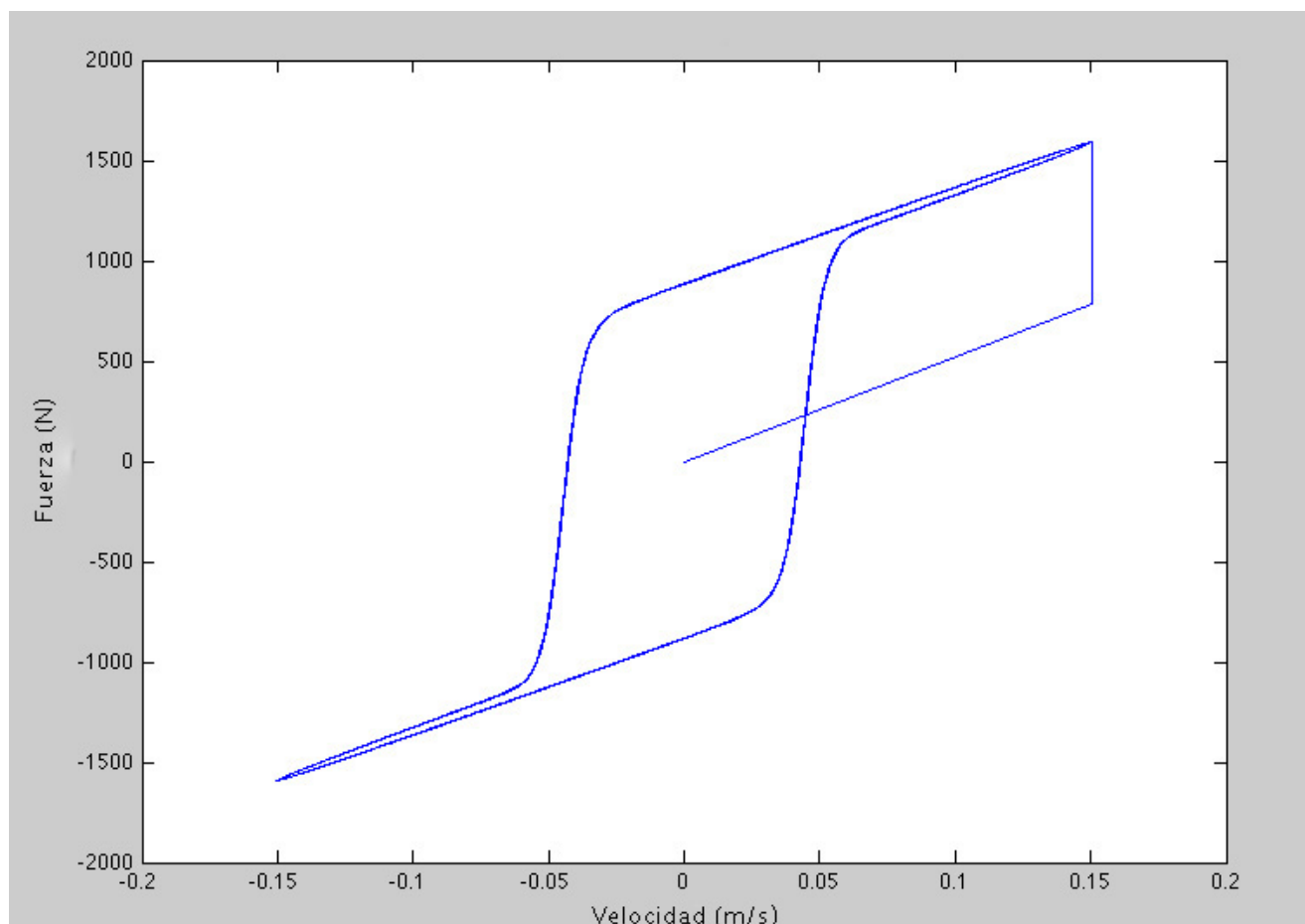


Figura 6.3 Gráfica Velocidad (m/s) – Fuerza (N)

En la gráfica se observa el carácter histerético de la velocidad, y los valores obtenidos para ésta se asemejan mucho con los obtenidos en ensayos experimentales, no obstante para valores próximos a la velocidad crítica negativa, el modelo de Bouc-Wen no representa un déficit de llenado del amortiguador con el fluido de trabajo, esta característica supone que para estos valores en el ensayo real se obtengan resultados extremos de la velocidad mayores, con menores valores de fuerza. Pese a ello este hecho no supone la invalidez del modelo ya que realmente el déficit de llenado es un problema de montaje más que de comportamiento físico. Finalmente se puede decir que el modelo representa fielmente el comportamiento dinámico del amortiguador y por tanto puede emplearse para el control del mismo dentro de los sistemas de suspensión, además este modelo ha sido modificado posteriormente y existen valores de corrección para el fenómeno que se acaba de describir.

6.2 Modelo dinámico

En este punto se presentan los resultados del modelo dinámico, al igual que para el modelo anterior primero se muestran los valores introducidos en el programa para la simulación y después las gráficas obtenidas como resultados. En este modelo, como ya se ha comentado, gracias a su sencillez

existen menos variables de entrada, pese a que los valores de las constantes esten obtenidos a partir de una corriente y no puedan ser cambiados dentro del programa que se presenta.

6.2.1 Introducción de las variables

De la misma forma que en el caso anterior, los valores de las variables se han escogido por ser los utilizados dentro del ensayo real, ya que el objetivo último de la simulación es obtener unos resultados, mediante la programación, lo más claros posibles y que aporten datos sobre el comportamiento teórico del amortiguador MR.

Los valores de las variables de entrada son los expuestos en la Tabla 4.

Tabla 6.2 Valores de las variables de entrada del modelo dinámico

A (m)	0.005
f (Hz)	1.5

Los valores que se muestran en la Tabla 4 corresponden a la amplitud y la frecuencia de la excitación aplicada al amortiguador, estos valores se pueden observar posteriormenete en los reultados como puntos críticos de las curvas representadas en las gráficas. No es preciso comentar que en este caso no se contempla el valor de X_0 , como en el modelo anterior, ya que se presupone un estado inicial con valor nulo de la fuerza reultante.

Finalmente se exponen en el apartado 6.2.2 los resultados de la simulación.

6.2.2 Interpretación de los resultados

El nodo "Scope" que escanea la señal de entrada recoge todos los valores que va tomando la variable, de modo que si se le asigna a la función de reloj un paso de 10 décimas de segundo, el nodo escanea y representa en la gráfica 10 valores por segundo. Hay que tener en cuenta el valor que se le da al paso de la variable de entrada ya que de ello derivan los resultados, y de no tener un paso adecuado pueden ocurrir dos cosas: la primera, si el paso es demasiado grande, los valores tomados por la señal de entrada pueden no ser los suficientes como para obtener un resultado fiable, ya que se perderían muchas zonas de la gráfica de salida. Por otro lado en un segundo caso, si el paso es demasiado pequeño, la dificultad de cálculo del sistema puede exigir un tiempo de respuesta demasiado elevado.

La gráfica XY de la señal de entrada se muestra en la Figura 6.4.

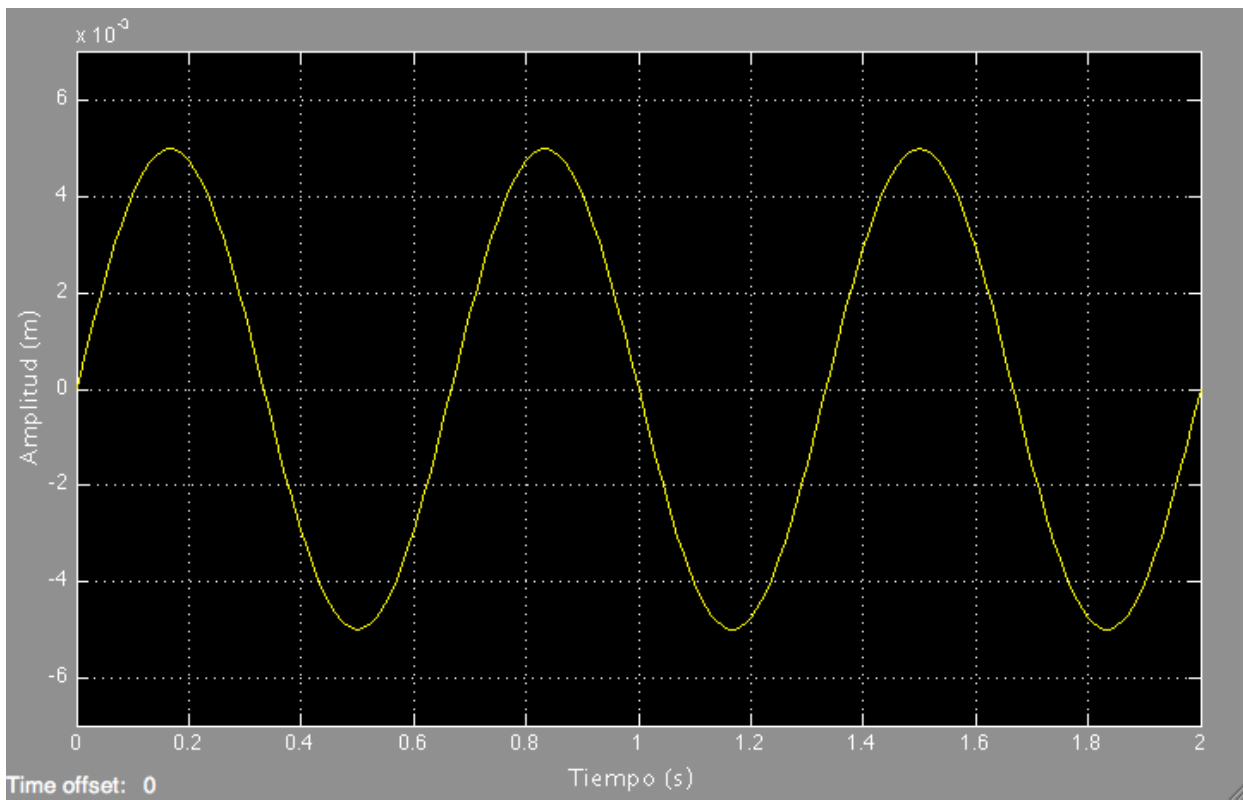


Figura 6.4 Gráfica de la variable de entrada "x"

Se observa en la Figura 6.4 el comportamiento sinusoidal de la señal de entrada, así como los valores críticos de la amplitud de oscilación ($A_{\text{máx}}=5 \times 10^{-3}$) y el periodo de oscilación. Si se observa con detenimiento la curva se puede advertir que no existe una continuidad total en curvatura, es decir, que la curva está formada por rectas que unen los valores tomados por la variable. Como se ha explicado al comienzo de este punto, cuanto menor paso se da a la función de reloj mayor número de valores se tendrán en cuenta para el cálculo, y en consecuencia la curva tendrá el aspecto de mayor continuidad en curvatura.

La siguiente gráfica enfrenta los valores de la señal de entrada, expuestos en la Figura 6.4, con los resultados obtenidos para la fuerza resultante del amortiguador. Es evidente el parecido con la misma gráfica del modelo anterior ya que, como se ha comentado, ambos modelos pretenden representar el comportamiento físico del mismo tipo de amortiguador y por tanto los mismos fenómenos. La gráfica se expone en la Figura 6.5.

En la gráfica se puede observar el comportamiento biviscoso del fluido de trabajo en la compresión y en la extensión del bástago, de ahí que exista un menor radio de curvatura en las zonas de desplazamiento crítico negativo y fuerza máxima negativa, y de desplazamiento y fuerza máximos positivos, este fenómeno se explica atendiendo a que en la carrera de compresión el fluido comienza a pasar a la cámara secundaria por las válvulas, la presión en esta cámara comienza a crecer según

aumenta el volumen de fluido, esta presión es directamente proporcional al valor de la fuerza de compresión del bástago y por tanto será mayor en el punto de máximo desplazamiento en la carrera de compresión. En la carrera de expansión la presión existente dentro de la cámara secundaria es ahora positiva para la fuerza del amortiguador, ya que primero impulsa al fluido por la válvulas, suponiendo una ganancia para la fuerza de expansión del bástago, y va desapareciendo conforme el volumen dentro de la cámara secundaria se va reduciendo.

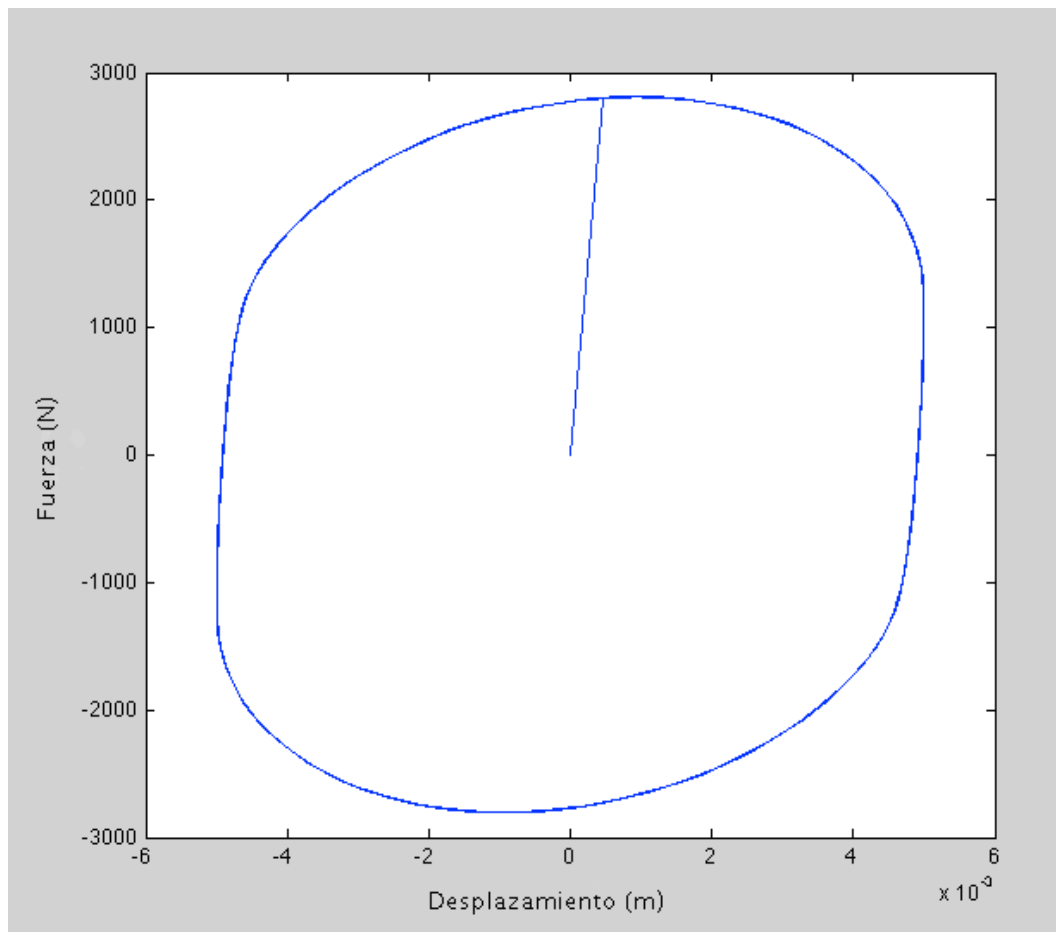


Figura 6.5 Gráfica Desplazamiento (m) – Fuerza (N)

Este modelo no contempla los efectos de inercia como en el modelo de Bouc-Wen, no obstante estos efectos no son demasiado relevantes a la hora del cálculo y como ya se ha comentado la simplicidad del modelo es tanto una ventaja, ya que permite un cálculo sencillo y rápido, como una desventaja por motivos como este.

La siguiente gráfica relaciona la velocidad derivada de la variable de entrada (desplazamiento) con la fuerza resultante del amortiguador. Como en el caso anterior el ciclo de histéresis de la gráfica es muy parecido al del modelo de Bouc-Wen por las razones ya comentadas. Los resultados se exponen en la Figura 6.6:

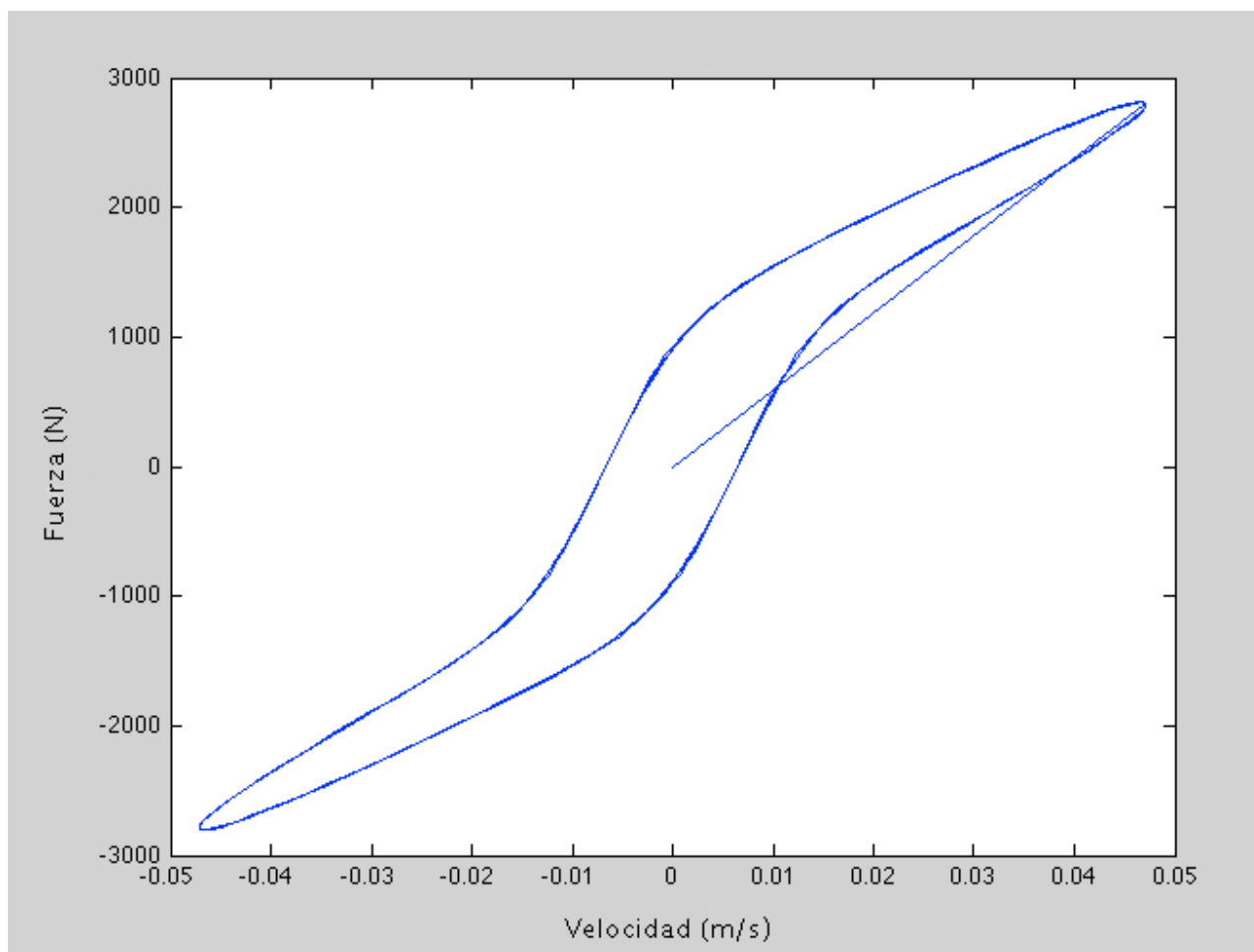


Figure 6.6 Gráfica Velocidad (m/s) – Fuerza (N)

Se observa en la gráfica el comportamiento histerético de la fuerza en relación con la velocidad. Este efecto es derivado de la histéresis que existe en los materiales que conforman el amortiguador, de forma que cuando cesa la fuerza ejercida sobre él, no desaparecen instantáneamente las consecuencias generadas sobre los materiales (compresiones o torsiones). En comparación con la misma gráfica del modelo de Bouc-Wen, se observa un crecimiento mas homogéneo de la fuerza con la velocidad.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y

FUTUROS DESARROLLOS

7.1 Conclusiones

En este proyecto se han programado dos modelos de un amortiguador magneto-reológico. Para obtener resultados de la simulación se han construido, mediante la herramienta Simulink, dos programas que permiten resolver las ecuaciones del modelo dinámico y de Bouc-Wen. Ambos modelos describen el comportamiento físico de un amortiguador MR al que se le induce una determinada corriente. En consecuencia, el campo inducido por el imán electromagnético tendrá unas características constantes y a su vez, las características del fluido de trabajo serán también constantes.

En el programa del modelo de Bouc-Wen se tiene como entradas del sistema la frecuencia, la amplitud del movimiento inducido al amortiguador y la corriente. Se puede observar como al aumentar la corriente de entrada del amortiguador se obtiene como resultado un aumento en la fuerza desarrollada. Este fenómeno se muestra en la Figura 7.1 y 7.2.

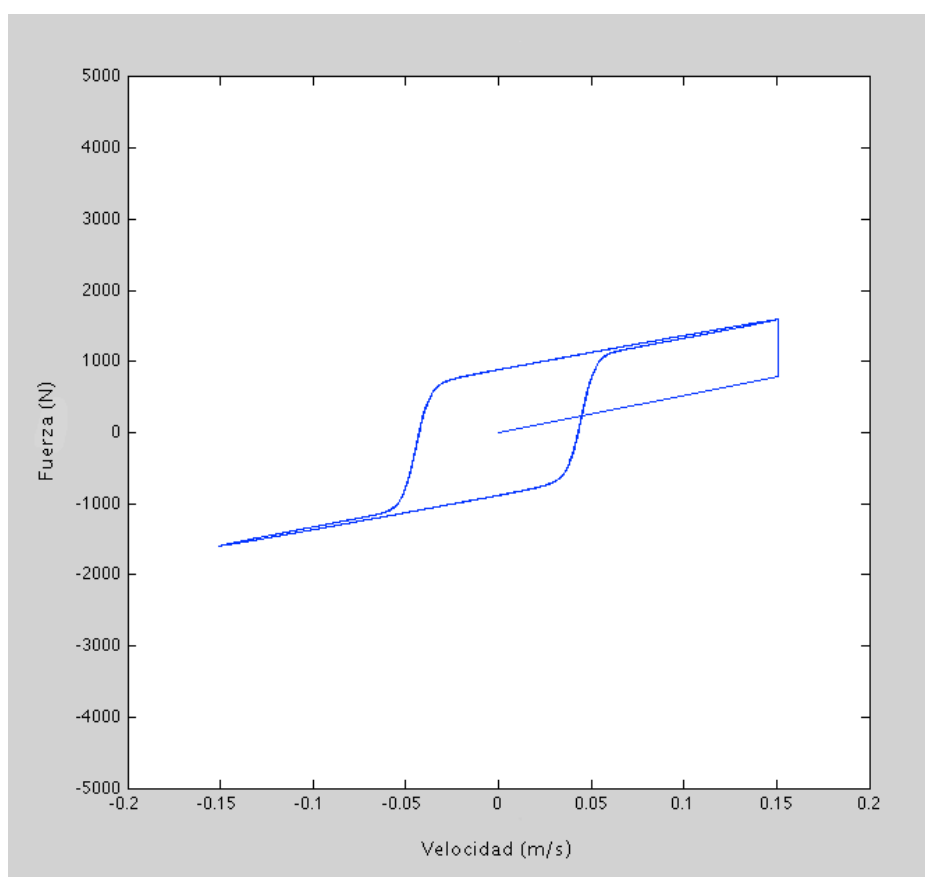


Figura 7.1 Gráfica Velocidad (m/s) - Fuerza (N) para una tensión de 1.75 V

Si se compara la gráfica de la Figura 7.1 con la de la Figura 7.2 se observa una mayor inclinación de la curva de histéresis, esto supone que para los mismos valores de velocidad se obtienen valores mayores de la fuerza. La explicación de este fenómeno se deduce del aumento de la viscosidad del fluido

reológico al ser sometido a un campo magnético de mayor intensidad, como en el caso de la Figura 7.2, con una tensión inducida al imán de 10 V.

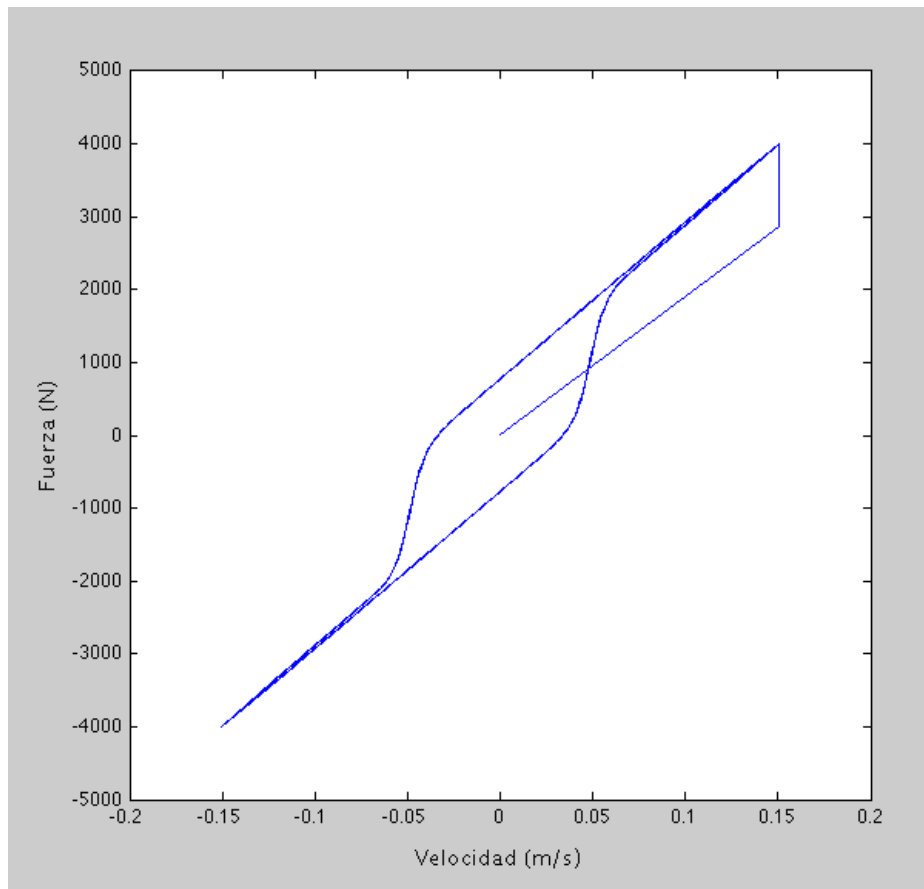


Figura7.2 Gráfica Velocidad (m/s) - Fuerza (N) para una tensión de 10 V

Para el modelo dinámico se tiene el mismo efecto, no obstante dentro del programa de este modelo no se tiene como entrada la corriente ya que las constantes A_1 y A_2 son dependientes de la señal y se obtuvieron por el método de mínimos cuadrados.

Los resultados de ambos modelos presentan un comportamiento simétrico en la carrera de compresión y expansión del amortiguador y el modelo de Bouc-Wen, como podemos observar en la Figura 7.1, presenta un gran descenso de la pendiente de la curva para los valores extremos de la velocidad; este efecto se debe a que este modelo, al contrario que el modelo dinámico, representa los efectos de inercia del vástago, teniendo un incremento de la fuerza menos significativo con el aumento de la velocidad.

Por otro lado comparando las síntesis matemáticas de ambos modelos se puede observar como para el modelo de Bouc-Wen se tiene una síntesis mas complicada que para el modelo dinámico, esto conlleva que sea necesario emplear más tiempo en resolver las ecuaciones del modelo de Bouc-Wen y con ello se tenga un tiempo de respuesta mayor en este caso. Un mayor tiempo de respuesta supone, si

se utiliza este modelo para los cálculos de una suspensión adaptativa, reducir la eficacia de dicha suspensión.

Se puede concluir que el modelo de Bouc-Wen representa fielmente el carácter biviscoso, histerético y no lineal del amortiguador, además de que incluye los efectos de inercia del vástago dentro del cálculo. Por otro lado, el modelo dinámico, pese a no ser tan eficaz a la hora de representar fielmente el comportamiento físico del amortiguador, presenta una síntesis sencilla y útil para el cálculo en sistemas de suspensión adaptativa, ya que supone un menor tiempo de respuesta. Finalmente se resuelve que ambos modelos resultan válidos para la simulación del comportamiento de los amortiguadores MR, teniendo cada uno de ellos las ventajas e inconvenientes que se han indicado.

7.2 Futuros desarrollos

En la actualidad, los fabricantes de vehículos luchan por intentar innovar en un mercado en el cual las nuevas tecnologías cobran especial importancia a la hora de captar la atención de los clientes. Por otra parte, se intenta dotar a los vehículos de sistemas que garanticen la máxima seguridad y confort en marcha para sus ocupantes. En esta línea de innovación y desarrollo tiene su fundamento este proyecto. Tomando como base el estudio previo realizado de los modelo de un amortiguador magneto-reológico, se han modelado los programas que simulan el comportamiento de este amortiguador. No obstante, los horizontes de este campo de trabajo son muy diversos. Por ello, se proponen las siguientes líneas de trabajo e investigación para futuros desarrollos:

- Siguiendo la línea de este proyecto se puede realizar un estudio de optimización de los parámetros del amortiguador.
- Con el fin de validar los programas expuestos en este proyecto, se pueden realizar los ensayos reales obteniendo los resultados para compararlos con los de la simulación.
- Futuros desarrollos pueden dirigirse a la realización de un modelo más refinado, en el que se tenga en cuenta el comportamiento no simétrico del amortiguador cuando este está trabajando a compresión y cuando está regresando a su posición nominal, y así obtener un modelo que se ajuste más al funcionamiento real del amortiguador.

ANEXO

A.1 Anexo/Especificaciones

Las características técnicas requeridas por el *software* de programación que se ha utilizado en este documento se muestran en las Figuras A.1, A.2 y A.3: ordenadas según el sistema operativo en que va a ser instalado en *software*.

Windows

Operating Systems	Processors	Disk Space	RAM
32-Bit and 64-Bit MATLAB and Simulink Product Families			
Windows 7 or Service Pack 1	Any Intel or AMD x86 processor supporting SSE2 instruction set*	1 GB for MATLAB only, 3–4 GB for a typical installation	1024 MB (At least 2048 MB recommended)
Windows Vista Service Pack 2			
Windows XP Service Pack 3			
Windows XP x64 Edition Service Pack 2			
Windows Server 2008 Service Pack 2 or R2			
Windows Server 2003 R2 Service Pack 2			

Figura A.1 Requerimientos técnicos para Windows.

Mac

Operating Systems	Processors	Disk Space	RAM
64-Bit MATLAB and Simulink Product Families			
Mac OS X 10.7 (Lion)	All Intel-based Macs with an Intel Core 2 or later	1 GB for MATLAB only, 3–4 GB for a typical installation	1024 MB (At least 2048 MB recommended)
Mac OS X 10.6.4 (Snow Leopard) and above with Apple Java for Mac OS X Update 2 and above			

Figura A.2 Requerimientos técnicos para Mac.

Linux

Note: Release 2012a is the last release of the 32-bit version of MATLAB for Linux. Support for the 64-bit version of MATLAB on Linux will continue. See the [platform road map](#) for more information.

Operating Systems	Processors	Disk Space	RAM
32-Bit and 64-Bit MATLAB and Simulink Product Families			
Qualified distributions*: Ubuntu 10.04 LTS, 11.04, 11.10 Red Hat Enterprise Linux 5.x and 6.x SUSE Linux Enterprise Desktop 11.x Debian 6.x	Any Intel or AMD x86 processor supporting SSE2 instruction set**	1 GB for MATLAB only, 3–4 GB for a typical installation	1024 MB (At least 2048 MB recommended)

Figura A.3 Requerimientos técnicos para Linux

BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHACÓN HERNANDO, Victor. "Diseño de una suspensión para un vehículo automóvil basada en amortiguadores magneto-reológicos". Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería Mecánica. Año 2010.
- [2] "Mecánica general de vehículos". Año 2010.
http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html
- [3] LÓPEZ FERNÁNDEZ, David. "Montaje y estudio de un amortiguador magneto-reológico RD 1005.3 en la suspensión de un vehículo automóvil". Directora: M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería Mecánica. Año 2010.
- [4] CUPICH RODRÍGUEZ, Miguel y ELIZONDO GARZA, Fernando J. "Amortiguadores magneto-reológicos" FIME-UANL, Departamento de Dinámica. Año 1998.
- [5] ALBERDI URBIETA, Juan. "tecnun: Amortiguadores y Suspensión". Campus Tecnológico de la Universidad de Navarra. Año 2003. Disponible en web:
<http://www.tecnun.es/automocion>
- [6] BRAVO, E., CHACÓN, P. Y RIVAS, F. "Amortiguadores Magneto-reológicos". Universidad Politécnica Salesiana. Año 2011.
- [7] OVIEDO GUTIERREZ, Diego. "Optimización del modelo de Bouc-Wen de un amortiguador magneto-reológico mediante algoritmos genéticos". Directoras: Beatriz López Boada y M^a Jesús López Boada. Universidad Carlos III, Departamento de Ingeniería Mecánica. Año 2010.
- [8] RODRIGO, José Ángel. "Mecánica y Electricidad". Centro Zaragoza. Año 2003.
- [9] ANTA MARTÍNEZ, Adolfo, ZAMORA MACHO, Juan Luís y RODRÍGUEZ, Ramón. "Manual de referencia de Matlab & Simulink". Universidad Pontificia de Comillas, E.T.S.I. – I.C.A.I., Departamento de Electrónica y Automática. Año 2000.
- [10] LUQUE, P., ÁLVAREZ, D. y VERA, C. "Ingeniería del automóvil y sistemas de comportamiento dinámico" Thomson Editores Spain. Paraninfo S.A. Año 2004.
- [11] Shuqi Guo, Shaopou Yang y Cunzhi Pan. "Dynamic Modeling of Magnetorheological Dampers Behaviors". Journal of Intelligent Material System and Structures. Año 2006. Disponible en web:
<http://jim.sagepub.com/content/17/1/3>
- [12] GIUCHA, M., SIRETEANU, T., STANCIOIU, D. y STAMMERS, C. W. "Model parameter identification for vehicle vibration control with magnetorheological dampers using computational intelligence methods". Institute of Solid Mechanics, Romanian Academy. Publicado por IMechE. Año 2004.

[13] Documentación e ilustraciones. Año 2012.

<http://www.km77.com>

[14] Mat. Int. I y II: LÓPEZ GARCÍA, Oscar, CARNICERO LÓPEZ, Alberto y RUIZ PABLOS, Rosa. “Materiales inteligentes I/II: 1ª parte: Introducción a los materiales del siglo XXI. Anales de mecánica y electricidad”. Año 2003.